



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

“Desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica”

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Autor: Isidoro Ibáñez Labiano

Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Directores: Sergio Rota Rodrigo
Rosa Ana Pérez Herrera
Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 27 de Julio 2012

PREÁMBULO

Este proyecto ha sido llevado a cabo por Isidoro Ibáñez Labiano, estudiante de Ingeniería de Telecomunicación en la Universidad Pública de Navarra (UPNA) en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIT). Decidí cursar esta carrera, en mi caso sin especialización, a fin de adquirir competencias en diversos campos y también con la intención de mejorar yo mismo.

Después de realizar la titulación escogí realizar mi Proyecto Fin de Carrera (PFC) en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (DIEE), en el grupo de Comunicaciones Ópticas junto al Dr. Manuel López-Amo Sainz. Tome esta decisión por diversas razones, pero la más significativa fue por la posibilidad de realizar el PFC sobre un campo en clara etapa de desarrollo e innovación y junto con un equipo humano y tecnológico puntero en dicho sector.

Los más importantes objetivos que se persiguen en este PFC se relacionan con el análisis de diversos sistemas para láseres multilínea de fibra óptica. Sería interesante obtener una caracterización experimental de las mismas, utilizando diferentes tipos de evaluaciones, teorías y análisis.

A fin de lograr nuestro objetivo el DIEE ha puesto a mi disposición varios equipos, software y servicios para trabajar en mi PFC. En cuanto al sistema experimental, con el que he estado trabajando, se explicará con precisión en próximos capítulos. Sin embargo, puede decirse que contiene los dispositivos necesarios para desarrollar todas nuestras tareas relacionadas con las mediciones de una manera correcta y segura.

Este proyecto no es sólo un análisis sobre datos obtenidos y medidas realizadas, sino que también ha sido necesario llevar a cabo un trabajo de documentación e investigación debido a la dificultad que suponía trabajar en un campo tan puntero como son las estructuras avanzadas para láseres de fibra óptica.

Por otro lado, la parte experimental ha consistido en tomar una gran cantidad de datos y mediciones con los equipos del laboratorio, para analizar después con que sistema se obtienen mejores prestaciones, así como las propiedades de los dispositivos ópticos utilizados y las distintas fibras ópticas empleadas. Por lo que también se podría decir que otro objetivo de este trabajo ha sido definir una metodología adecuada tanto teórica como experimental para desarrollar nuevas estructuras para láseres multilínea de fibra óptica, a fin de innovar en dicho campo.

RECONOCIMIENTOS

Este PFC ha sido desarrollado en el DIEE de la UPNA en el grupo de Comunicaciones Ópticas y bajo la dirección de Dr. Manuel López-Amo Sainz.

Primeramente me gustaría agradecer a Sergio Rota Rodrigo y Rosa Ana Pérez Herrera su colaboración, así como orientación y apoyo durante este periodo. Estuvieron en todo momento disponibles para guiarme y aconsejarme, sobre en que aspectos focalizar el estudio y cuales eran las mejores maneras de lograrlo. Además, en la parte experimental del proyecto fueron un soporte básico, ya que me ayudaron a entender el funcionamiento de todos los equipos del laboratorio y el correcto funcionamiento de los experimentos.

Especial agradecimiento al Dr. Manuel López-Amo Sainz, como máximo responsable del departamento por darme la oportunidad de realizar este PFC y el acceso a los equipos del laboratorio. También por facilitarme gran cantidad de información para mejorar mis conocimientos sobre las estructuras avanzadas para láseres de fibra óptica. Además, de todos sus consejos sobre el análisis de datos y las correcciones que realizo.

Hacer mención a mis compañeros de promoción de la UPNA y de Erasmus, por compartir conmigo parte de este trayecto.

Por último agradecer a mi familia Ibáñez Labiano por el apoyo y comprensión mostrados durante todo este tiempo, especialmente a mi hermana Amaia Ibáñez Labiano y a mi madre Isabel Labiano Hualde.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Niveles de energía del erbio

Figura 2.2. Sistema básico de un EDFA, con bombeo bidireccional

Figura 2.3. Espectro de ganancia de un EDFA, con bombeo a 980 nm

Figura 2.4. Espectro del ruido ASE

Figura 2.5. Diagrama de energía de varias interacciones Raman

Figura 2.6. Espectros de ganancia de diversos amplificadores

Figura 2.7. Esquema del bombeo Raman

Figura 2.8. Espectro de la señal a amplificar (Izquierda), Espectro señal amplificada con ruido ASS (Derecha)

Figura 2.9. PCF con diámetro del núcleo 5 μm y núcleo de los agujeros 4 μm

Figura 2.10. Sección transversal de una PCF

Figura 2.11. Efecto de confinamiento de la luz en el núcleo en una fibra cristal de fotónico

Figura 2.12. Sección transversal del núcleo de una fibra óptica en la que se aprecian dos casos de geometría: circular y elíptica. Son casos de un material no birrefringente y birrefringente, respectivamente

Figura 2.13. Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente

Figura 2.14. Las siguientes gráficas muestran el perfil de su índice de refracción y la curva de atenuación con la longitud de onda

Figura 2.15. Curvas de transmisión y reflexión de los canales ópticos de un OADM

Figura 2.16. Optical add-drop multiplexer, usando FBG y dos circuladores ópticos

Figura 2.17. Fotografía de un MUX-DMUX comercial

Figura 2.18. Un sistema WDM y sus elementos básicos, se extrae la longitud de onda 4

Figura 2.19. Espectro MUX y DMUX interconectados

Figura 2.20. Fotografía del filtro sintonizable

Figura 2.21. Fotografía de un atenuador variable

Figura 2.22. Fotografía de un acoplador comercial

Figura 2.23. Acoplador $M : N$

Figura 2.24. Gráfico de funcionamiento de un aislador

Figura 2.25. Los FBG reflejan las longitudes de onda de la luz que coinciden con el periodo del grating y dejan pasar el resto de longitudes de onda

Figura 2.26. Circulador óptico

Figura 2.27. Esquema de un circulador

Figura 3.1. Láser Amonics a 980nm

Figura 3.2. Resonador Fox-Smith

Figura 3.3. Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo (a) y un medio inhomogéneo (b)

Figura 3.4. Láseres monomodo y multimodo

Figura 3.5. Esquema básico de una doble cavidad

Figura 3.6. Espectro óptico salida multimodo para λ_1 (a), espectro de salida monomodo para λ_1 (b)

Figura 4.1.1. Láser multilínea usando OADMs

Figura 4.1.2. Filtro 1 negro, Filtro 2 rojo

Figura 4.1.3. Estructura con filtro sintonizable
Figura 4.1.4. Láser multilínea usando OADMs y acoplador 4x2
Figura 4.1.5. Comparación entre MUX y Couple (Hi-Bi de 3 m)
Figura 4.1.6. Interferómetro Hi-Bi de 3 m y espectro Add-Drop sin atenuar (rojo)
Figura 4.1.7. Interferómetro Hi-Bi de 3 m y espectro Add-Drop atenuado
Figura 4.1.8. Espectro con sólo tres longitudes de onda con condición láser
Figura 4.1.9. Gráfica de comparación de los espectros del interferómetro de 3 y 1,5 metros
Figura 4.1.10. Comparación de espectros MUX y Couple, con fibra Hi-Bi 1,5 metros
Figura 4.1.11. Comparación de espectros MUX y Couple, con fibra Hi-Bi 3 metros
Figura 4.1.12. Comparación del espectro con 3 lambdas para Hi-Bi de 1,5 y 3 metros y MUX

Figura 4.2.1. Fotografía panorámica de la estructura
Figura 4.2.2. Esquema de la estructura
Figura 4.2.3. Espectro final del sistema
Figura 4.2.4. Espectro con sólo tres longitudes de onda con condición láser
Figura 4.2.5. Función del Sagnac (rojo) y del DMUX-MUX (negro)
Figura 4.2.6. Láser de bombeo ILX Lightwave LDM-4980
Figura 4.2.7. (a) Bombeo sin aislador y (b) Bombeo con aislador
Figura 4.2.8. Comparativa de diferentes láseres de bombeo
Figura 4.2.9. Gráfico comparando amplificación Er-30 de 5 m y Hi-Bi de 2,25 (rojo) y 3 metros (negro)
Figura 4.2.10. Gráfico comparando amplificación EDFA y Hi-Bi de 2,25 (rojo) y 3 metros (negro)
Figura 4.2.11. Gráfico comparando el sistema para EDFA comercial y Er-30 de 5 metros (rojo), con Hi-Bi de 2,25 metros
Figura 4.2.12. Gráfico comparando el sistema habitual para EDFA y Er-30 de 5 metros (rojo), con Hi-Bi de 3 metros
Figura 4.2.13. Valores inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 3 metros
Figura 4.2.14. Valores inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 2,25 metros
Figura 4.2.15. Valores inestabilidad EDFA y Hi-Bi 3 metros
Figura 4.2.16. Valores inestabilidad EDFA y Hi-Bi 2,25 metros
Figura 4.2.17. Esquema con filtro sintonizable
Figura 4.2.18. Espectro con filtro sintonizable, EDFA y Hi-Bi de 3 de metros
Figura 4.2.19. Acopladores
Figura 4.2.20. Comparación 90:10 y 70:30 (rojo) con la fibra Hi-Bi de 2,25 metros
Figura 4.2.21. Comparación 90:10 y 70:30 (rojo) con la fibra Hi-Bi de 3 metros
Figura 4.2.22. Comparación 90:10 con la fibra Hi-Bi de 2,25 y 3 metros (rojo)
Figura 4.2.23. Comparación 70:30 con la fibra Hi-Bi de 2,25 y 3 metros (rojo)
Figura 4.2.24. (a) Longitud de onda con emisión de línea monomodo del extremo izquierdo (b) del extremo derecho y (c) Ambas

Figura 4.3.1. Esquema estructura Fox-Smith
Figura 4.3.2. Esquema de la estructura Michelson
Figura 4.3.3. a) Con bombeo y b) Sin bombeo
Figura 4.3.4. Espectro con el acoplador 90:10
Figura 4.3.5. Estructura con tres tramos de Er-80 y bombeo más EDFA
Figura 4.3.6. Espectro de la estructura con el acoplador variable
Figura 4.3.7. Esquema sin bombeo
Figura 4.3.8. Esquema con FBG sintonizable

- Figura 4.3.9. Con un FBG fijo a 1559,5 nm*
Figura 4.3.10. Estructura analizada como sensor
Figura 4.3.11. Espectro de la estructura
Figura 4.3.12. Valores estabilidad de la estructura
Figura 4.3.13. Captura del BOSA
Figura 4.3.14. De color negro la estructura sin aplicarle calor, en color rojo después de aplicarle calor
Figura 4.3.15. De color negro la estructura sin presión, en color rojo después de depositar el dispositivo
Figura 4.3.16. Esquema con láser sintonizable ANDO
Figura 4.3.17. a) Sin suprimir el segundo lóbulo y b) Una vez suprimido
Figura 4.3.18. Gráfica de los valores de la Tabla 4.3.3.
Figura 4.3.19. Espectro con el LS a 1560,45 nm
Figura 4.3.20. Capturas con el BOSA para los tres casos
Figura 4.3.21. Espectro con dos láseres sintonizables
Figura 4.3.22. Esquema de la estructura, OSA y BOSA
Figura 4.3.23. Espectro de nuestra estructura más el LS ANDO
Figura 4.3.24. Captura con el BOSA del sistema
Figura 4.3.25. a) Espectro LS 1562,05 nm en el OSA y b) BOSA
Figura 4.3.26. Inyection Seeding 1559,5 nm
Figura 4.3.27. Captura BOSA Inyection Seeding 1559,5 nm
Figura 4.3.28. Esquema de la estructura con el atenuador variable
Figura 4.3.29. Espectro con el atenuador variable
Figura 4.3.30. Espectro inicial de la prueba
Figura 4.3.31. Relación Longitud de onda vs distancia respecto al espejo
Figura 4.3.32. Sistema generador de vibraciones
Figura 4.3.33. Espectro inicial de la prueba del sistema generador de vibraciones
Figura 4.3.34. ZERO-SPAN a 1568,39 nm
Figura 4.3.35. Primera figura espectro de la señal y segunda ZERO-SPAN de la misma (1568,12 nm)
Figura 4.3.36. a) Sinusoidal, b) Cuadrada, c) Triangular y d) Rampa
Figura 4.3.37. Estructura Fox-Smith con bombeo Raman

LISTA DE TABLAS

Tablas 4.1.

Tabla 4.1.1. Inestabilidad de tres lambdas con MUX-DMUX y fibra Hi-Bi 3 metros

Tabla 4.1.2. Inestabilidad de tres lambdas con Couple 4:2 y fibra Hi-Bi 3 metros

Tabla 4.1.3. Canales MUX-DMUX ITU

Tabla 4.1.4. Valores de atenuación para el caso del MUX-DMUX

Tabla 4.1.5. Valores de atenuación para el caso del Couple 4:2

Tabla 4.1.6. Inestabilidad de tres lambdas con MUX-DMUX y fibra Hi-Bi 1,5 metros

Tabla 4.1.7. Inestabilidad de tres lambdas con Couple 4:2 y fibra Hi-Bi 1,5 metros

Tabla 4.1.8. Valores de atenuación para el caso del MUX-DMUX

Tabla 4.1.9. Valores de atenuación para el caso del Couple 4:2

Tablas 4.2.

Tabla 4.2.1. Longitud de onda exacta y aproximada de los canales

Tabla 4.2.2. Valores de atenuación para los canales del MUX-DMUX

Tabla 4.2.3. Inestabilidad en potencia óptica de salida

Tabla 4.2.4. Inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 3 metros

Tabla 4.2.5. Inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 2,25 metros

Tabla 4.2.6. Inestabilidad EDFA y Hi-Bi 3 metros

Tabla 4.2.7. Inestabilidad EDFA y Hi-Bi 2,25 metros

Tablas 4.3.

Tabla 4.3.1. Inestabilidad Amplitud C.L del 100%

Tabla 4.3.2. Inestabilidad Amplitud C.L del 100% con calor

Tabla 4.3.3. Barrido con el láser sintonizable

Tabla 4.3.4. Inestabilidad del sistema con Inyection Seeding

Tabla 4.3.5. Peso (50 gr) a diferentes distancias del espejo

Tablas 7.

Tabla 7.1. Salario base

Tabla 7.2. Cargas sociales

Tabla 7.3. Salario total bruto

Tabla 7.4. Material alquilado

Tabla 7.5. Material adquirido

Tabla 7.6. Coste total del PFC

ÍNDICE

PREÁMBULO	2
RECONOCIMIENTOS	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	7
1. INTRODUCCIÓN	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA	11
2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con tierras raras	11
2.1.2. Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA)	12
2.1.3. Ganancia en los EDFA	13
2.1.4. Ruido en los EDFA	14
2.1.5. Competencia por la ganancia en los EDFA	14
2.1.6. Amplificación Raman	15
2.1.7. Ruido en la amplificación Raman	16
2.2. TIPOS DE FIBRA	17
2.2.1. Fibra dopada con tierras raras	17
2.2.2. Fibra de cristal fotónico	17
2.2.3. Fibra de cristal fotónico dopada con erbio	19
2.2.4. Fibra altamente birrefringente	19
2.2.5. Fibra monomodo SMF	20
2.3. DISPOSITIVOS ÓPTICOS	21
2.3.1. Optical Add - Drop Multiplexers (OADM)	21
2.3.2. Multiplexadores (MUX) y Demultiplexadores (DMUX)	22
2.3.3. Filtro sintonizable	23
2.3.4. Atenuadores ópticos	24
2.3.5. Acopladores	24
2.3.6. Aisladores	25
2.3.7. Control de polarización	26
2.3.8. Redes de difracción en fibra (FBG)	27
2.3.9. Circulador óptico	27
3. EL LÁSER	29
3.1. Tipos de láseres según el medio de ganancia	29
Láseres de fibra dopada con erbio (EDFL)	29
3.2. Tipos de láseres según el método de generación de las longitudes de onda	30
3.3. Limitaciones y características de los láseres	32
3.3.1. Forma de la ganancia	32
3.3.2. Spatial hole burning	32

3.3.3. Láseres multilínea (multi-wavelength)	33
Ecuación	33
Estabilidad	33
3.3.4. Láseres monomodo y multimodo	34
3.3.5. Doble cavidad	34
3.3.7. Absorbente saturable	35
3.3.8. Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales	35
4. PROCESO Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL	36
4.1. Láser multilínea usando multiplexadores ópticos Add-Drops	36
4.2. Láser multifrecuencia óptica usando un interferómetro Sagnac	46
4.3. Láser estructura FOX-SMITH / MICHELSON	60
5. CONCLUSIONES	85
6. LÍNEAS FUTURAS	87
7. PRESUPUESTO	88
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	92
A.1. Especificaciones del equipamiento empleado	93
A.2. Código Matlab	104
A.2.1. Código del script de Matlab para el cálculo de estabilidades	104
A.2.2. Código del script de Matlab para los intervalos de confianza de las estabilidades	105
A.3. OSA virtual – LabVIEW	109
A.4. Publicaciones / Publicaciones en revisión	110

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los campos importantes en la actualidad de los sistemas de fibra óptica en el cual se están realizando numerosas investigaciones y volcando muchos esfuerzos, es el de las estructuras avanzadas de fibra óptica para la generación de láseres multilínea, donde se utilizan diversos dispositivos ópticos comerciales y amplificación óptica.

En este proyecto se pretende utilizar distintos elementos ópticos para la generación de láseres multilínea, para ello se requiere la presencia de cavidades donde se introducirá amplificación óptica con el fin de conseguir la estimulación de las longitudes de onda de dichos dispositivos. Así como láseres con buenas prestaciones en: relación de señal óptica a ruido (OSNR), estabilidad, selectividad, etc.

Los láseres de emisión multilínea son de gran interés en diversos campos, como pueden ser los sistemas de comunicación con multiplexación en longitud de onda (WDM), sensores de fibra, procesado de señales, calibrado de instrumentos ópticos o espectroscopia. Por ello surge la idea de realizar este PFC, en el que se pretende conseguir nuevos láseres multilínea con buenas prestaciones y que además también tengan la propiedad de ser sintonizables.

El uso de los diferentes dispositivos ópticos (tales como: OADM, MUX-DMUX o PM-PCF interferómetro-Sagnac) se debe a los diversos factores y propiedades de cada uno, que darán como resultados diversos tipos de láseres, según el método de generación de las longitudes de onda y que debido a sus reducidas pérdidas de inserción y su gran selectividad, conseguirán láseres con una buena relación óptica de señal a ruido (OSNR).

La amplificación óptica necesaria se obtendrá mediante dos métodos diferentes en función de las necesidades del sistema. En el primero se hará uso de fibras dopadas con erbio (Erbium Doped Fiber, EDF) junto con un bombeo externo (habitualmente a 980nm) de una onda continua para conseguir un EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), este tipo de amplificación es muy común en el desarrollo de láseres de fibra, ya que precisa longitudes del orden de metros para obtener niveles de amplificación aceptables. El segundo método será por medio de amplificación Raman.

Por consiguiente el desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica es un tema en pleno desarrollo y actualmente de gran interés. Como demuestran el creciente número de publicaciones actuales relacionadas con este tema en revistas de alto índice de impacto y en los mejores congresos de fotónica del momento.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este segundo apartado se hará una breve descripción de los fundamentos teóricos, de los tipos de fibras utilizadas y de los dispositivos ópticos empleados para el diseño de las estructuras avanzadas de láseres multilínea que han servido como base para la realización de este proyecto fin de carrera. Primeramente se describirán las características de la amplificación óptica mediante el uso de fibras dopadas con tierras raras así como el caso de la amplificación Raman.

2.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA

Mediante el proceso de la amplificación óptica se consigue incrementar el nivel de señal óptica, manteniendo el resto de sus características sin alterar. Se trata de un elemento fundamental en el desarrollo de estructuras tales como los láseres de fibra.

Existen dos ventajas básicas en los amplificadores de fibra óptica, respecto a los amplificadores convencionales. La primera es que la potencia de bombeo necesaria es mucho menor, debido a que ésta se distribuye en una zona de unas pocas micras (μm) en el interior de la fibra, por lo que se consigue más fácilmente la intensidad de bombeo necesaria para la amplificación. Y en segundo lugar, que la fibra óptica puede enrollarse fácilmente, ocupando poco volumen, lo que permite utilizar amplificadores muy largos, para conseguir la máxima ganancia compatible con la potencia de bombeo utilizada. En la actualidad existen tres tipos básicos de amplificadores de fibra óptica: los de núcleo dopado con iones de tierras raras, los de dispersión Brillouin estimulada y los de dispersión Raman estimulada.

En este proyecto nos centraremos en los primeros donde la acción láser se obtiene por emisión estimulada, correspondiente a la transición entre dos niveles del ion de tierra rara, y las longitudes de onda de bombeo y de amplificación quedan fijadas por la estructura de niveles de dichos iones. Aunque también mencionaremos brevemente el último caso, ya que usaremos un láser bombeo Raman cuando requiramos potencias más altas, en torno a 1-1,5 vatios.

2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con tierras raras

Este tipo de amplificadores se obtienen al dopar el núcleo de la fibra con lo que se denominan tierras raras, concretamente lantánidos. Estos proporcionan dos niveles (niveles inferior y superior de la transición láser) entre los que se producen transiciones de absorción y emisión, a la longitud de onda para la que se quiere conseguir amplificación. Para ello es preciso que domine la emisión estimulada frente a la absorción.

Teniendo en cuenta que en el equilibrio térmico ocurre lo contrario, debido a la ley de Boltzman que regula la distribución de poblaciones, la situación requerida para que haya amplificación se denomina inversión de población. La inversión de población se consigue mediante el bombeo óptico a longitudes de onda concretas, provocando que los iones del medio dopante pasen de un estado fundamental a otro excitado, consiguiendo así la emisión estimulada. Dicha inversión de población que se va produciendo a lo largo de la fibra, va a su vez debilitando la intensidad de bombeo, llegando a hasta un punto que éste comienza a ser

incapaz de producirla. Este fenómeno condiciona la longitud que debe tener la fibra, llamada longitud óptima, para no desaprovechar su capacidad de amplificación, si se hace más corta, y evitar que parte de la fibra sea absorbente, si se hace más larga.

Otro aspecto de importancia para conseguir un amplificador óptimo, es la influencia de la concentración del dopante. Parece más razonable (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Pero esto no es válido, ya que cuando se tienen altas concentraciones se provocan interacciones entre los iones dopantes, que dejan de excitarse y se destruye la inversión de población, lo que disminuye la eficiencia del amplificador (lo veremos más adelante). Debido a esta razón se suelen usar fibras amplificadoras largas (de metros de longitud normalmente) y con baja concentración de dopante.

2.1.2. Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA)

El caso más utilizado es el del erbio (Er^{3+} llamado en inglés, Erbium doped fiber amplifier EDFA), debido a su baja atenuación cuando se trabaja en la tercera ventana de las comunicaciones ópticas (0,2 dB/Km), que es donde hemos desarrollado este proyecto fin de carrera. Además con este tipo de amplificadores se consiguen hasta 50/40 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada), con potencias de bombeo moderadas (de varias decenas de mW) [1].

En la siguiente figura se muestra el diagrama de los niveles de energía del erbio y las longitudes de onda de bombeo necesarias para alcanzarlos.

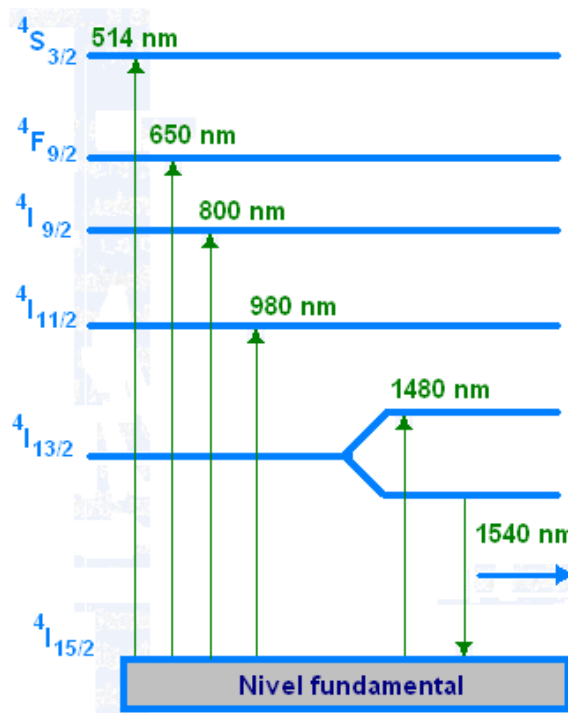


Figura 2.1. Niveles de energía del erbio

Como se aprecia en la representación anterior, la amplificación se da en el salto del último estado (entro los niveles de energía $4I_{13/2}$ y $4I_{15/2}$). Hay diferentes longitudes de bombeo, pero

por diversos motivos las dos más utilizadas y más eficientes son: 980 y 1480 nm. Con el fin de conseguir estabilidad en la potencia y en la longitud de onda emitidas, se requiere un control de la corriente de alimentación y de la temperatura de los láseres emisores. Esto último se lleva a cabo mediante refrigeradores que operan por efecto Peltier y para ayudar en la estabilización de la longitud de onda, suelen usarse también redes de Bragg de fibra óptica.

En la siguiente figura se muestra un esquema típico para un EDFA, con el bombeo que puede ser bidireccional. Éste se introduce mediante un multiplexor en longitud de onda, en inglés wavelength divisor multiplexor (WDM), para así poder combinarlo con la señal a amplificar. Los aisladores garantizan un solo sentido de circulación de la señal a amplificar.

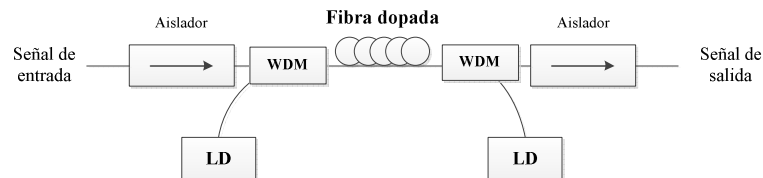


Figura 2.2. Sistema básico de un EDFA, con bombeo bidireccional

2.1.3. Ganancia en los EDFA

Hay que tener en cuenta que la optimización de la ganancia depende de la longitud óptima de la fibra y de la dependencia de ésta con parámetros como: la longitud de onda, la potencia del bombeo y la señal.

Al aumentar la potencia del bombeo conseguiremos invertir la población en un trozo de fibra más larga, aumentando así la longitud óptima de ésta. Si estamos trabajando en longitudes de onda donde el bombeo es más eficiente y es absorbido más rápidamente a lo largo de la fibra, la longitud óptima es menor. Y por último si aumenta la potencia de la señal, se provocan más emisiones estimuladas, lo que implica disminuir la inversión de población y, por tanto se acorta la longitud óptima (menos ganancia, pero más potencia de salida).

Como variamos la longitud de onda varía la probabilidad de emisión estimulada y como consecuencia lo hace la ganancia, de forma que cuando éstas son mayores, la inversión de población se reduce y a su vez lo hace la longitud óptima de la fibra.

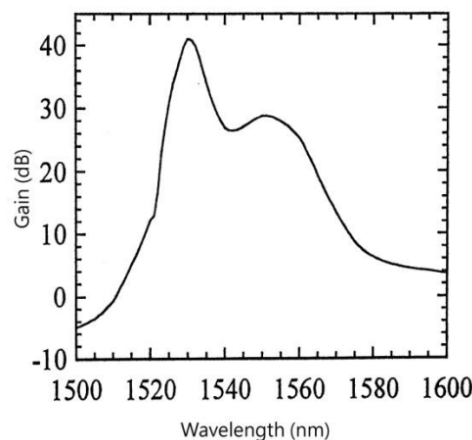


Figura 2.3. Espectro de ganancia de un EDFA, con bombeo a 980 nm

2.1.4. Ruido en los EDFA

El ruido de un EDFA viene producido principalmente por el proceso de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission - ASE). Durante el bombeo se producen emisiones espontáneas de fotones, que al propagarse por el propio EDFA son amplificados en la banda de la tercera ventana (1550 nm).

Existen dos tipos de ASE dependiendo del sentido de propagación con respecto al de la señal de entrada. Si es en el mismo se conoce como ASE+ o FASE (Forward Amplified Spontaneous Emission) y si es en sentido contrario se tendrá ASE- o BASE (Backward Amplified Spontaneous Emission). En la figura se puede ver una comparación de ambos para un sistema en el que el bombeo se realiza en el mismo sentido al de la señal a amplificar. La forma del ASE se aproxima a la de la curva de la ganancia del EDFA

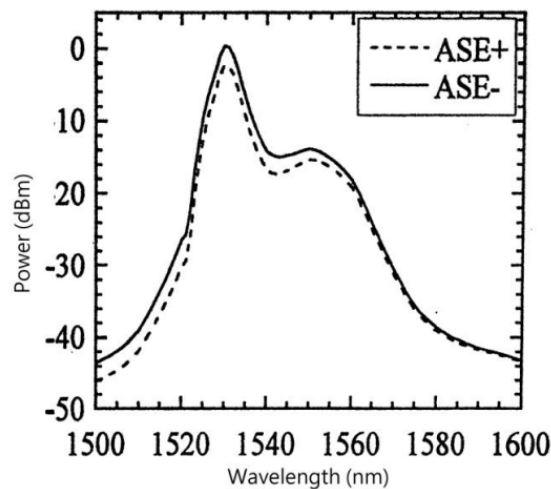


Figura 2.4. Espectro del ruido ASE

El ruido originado se evalúa mediante la figura de ruido, que expresa en escala logarítmica la relación entre la OSNR a la entrada y a la salida del amplificador. Existen modelos sencillos que permiten predecir la figura de ruido además de la ganancia de un EDFA. El ruido ASE generado a la salida de un amplificador de este tipo se puede calcular como:

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)hf \cdot B_0$$

Donde n_{sp} es el factor de emisión espontánea, G es la ganancia del amplificador y B_0 es el ancho de banda óptico del amplificador.

2.1.5. Competencia por la ganancia en los EDFA

La ganancia suministrada por un EDFA se ha de distribuir entre todas las longitudes de onda presentes a su entrada. Esto se debe a que los átomos de la capa superior, conseguidos por la inversión de población mediante el bombeo, tienen que ser compartidos por todas las señales incidentes. La competencia por la ganancia en los EDFA será importante en el desarrollo de este proyecto. Debido a que en los láseres multilínea de fibra óptica con varias longitudes de onda, la alteración de la amplitud de una de ellas provocará que el resto de longitudes de onda experimenten variaciones, esto originará problemas de estabilidad en las estructuras.

2.1.6. Amplificación Raman

Los dispositivos que utilizan este método, consiguen amplificar la señal óptica mediante la dispersión Raman o también el denominado efecto Raman, es una dispersión inelástica de un fotón.

Cuando la luz es dispersada, la mayoría de los fotones son dispersados elásticamente (Dispersión de Rayleigh). Los fotones dispersados tienen la misma energía (frecuencia/longitud de onda) que los fotones incidentes. Sin embargo, una pequeña fracción de la luz (aproximadamente 1 de 10^7 fotones) es dispersada ópticamente a frecuencias diferentes, mayormente inferiores, que la frecuencia de los fotones incidentes y la diferencia de energía se transfiere al material dando lugar a vibraciones moleculares, desapareciendo el fotón inicial.

Para el proceso de amplificación se bombean dos ondas, la primera correspondiente a la señal que se quiere amplificar y la segunda a la longitud de onda de Stokes, encargada de estimular la dispersión Raman.

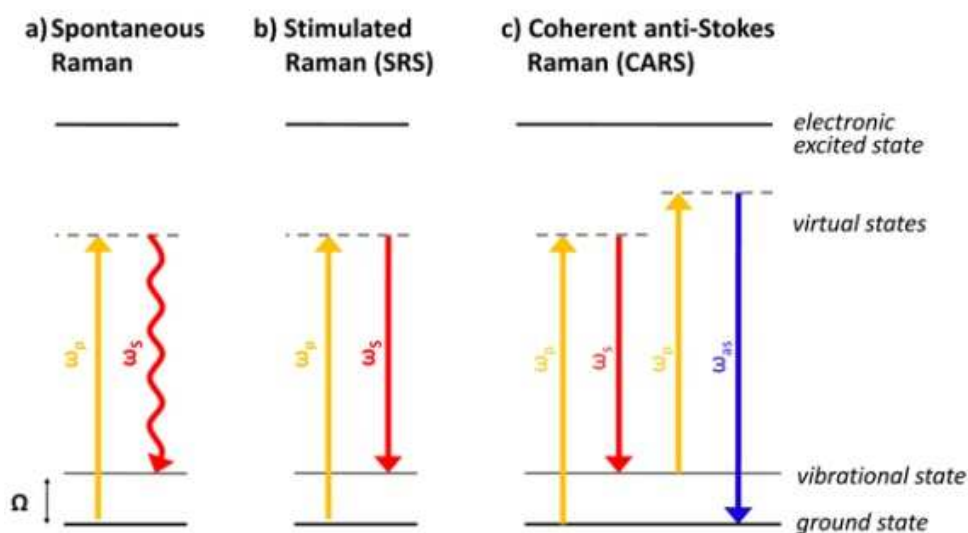


Figura 2.5. Diagrama de energía de varias interacciones Raman

Las frecuencias que se pueden generar dependen las frecuencias características de las moléculas que componen el material (una fibra óptica es un material amorfo).

Además, si por la fibra se transmite más de un canal, cada uno dará lugar al efecto Raman en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre que estas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material.

El principal inconveniente que presentan estos amplificadores es la necesidad de una alta potencia de bombeo, cercana al vacío. Por el contrario una de sus ventajas es que cubre un margen de longitudes de onda no cubierto por los EDFA, por lo que pueden emplearse de forma complementaria. Este hecho queda reflejado en la siguiente figura, en la que se representa de forma aproximada las zonas de trabajo de cada uno. Como se ve empleando ambos amplificadores se obtiene en el rango comprendido entre los 1530 y 1600 nm una curva ganancia prácticamente plana.



Figura 2.6. Espectros de ganancia de diversos amplificadores

La señal de bombeo se puede acoplar a la fibra tanto en la misma dirección en la que se transmite la señal (bombeo codireccional) o en el sentido contrario (bombeo contradireccional). Es más habitual el bombeo contradireccional para evitar la amplificación de las componentes no lineales. Ya que el nivel de ruido que se obtiene es bajo especialmente cuando se usa junto con EDFAs.

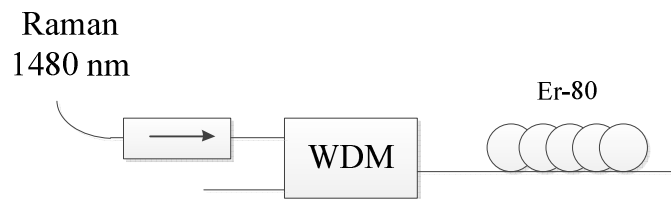


Figura 2.7. Esquema del bombeo Raman

2.1.7. Ruido en la amplificación Raman

El ruido que se genera proviene principalmente de dos fuentes, el procedente de la amplificación espontánea (similar al ruido ASE en los EDFAs) y el generado por la dispersión Rayleigh.

El primer tipo de ruido se conoce como BASS (Backward Amplified Spontaneous Scattering) o FASS (Forward Amplified Spontaneous Scattering) en función de su sentido de propagación. En la figura 2.9. se puede ver un ejemplo.

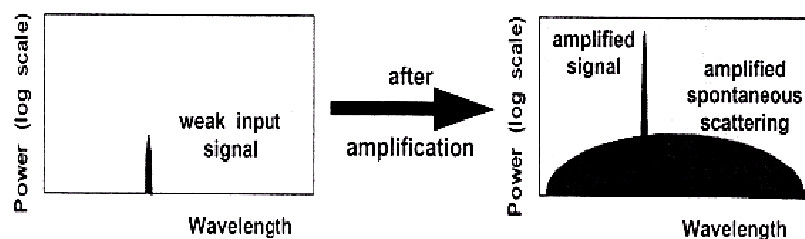


Figura 2.8. Espectro de la señal a amplificar (Izquierda), Espectro señal amplificada con ruido ASS (Derecha)

El segundo tipo de ruido esta provocado por la dispersión Rayleigh, fenómeno que aparece por reflexiones en imperfecciones en la fabricación de la fibra. La longitud de onda reflejada es de igual longitud de onda que la señal incidente. Hay que tener en cuenta que no sólo se producirá dispersión Rayleigh de la señal a amplificar sino que también le afectará al bombeo.

El bombeo contradiereccional tiene la ventaja de introducir menor nivel de ruido en la señal a amplificar, ya que las oscilaciones del bombeo no se acoplan a la señal.

2.2. TIPOS DE FIBRA

2.2.1. Fibra dopada con tierras raras

Este tipo de fibra óptica es la utilizada como medio para obtener amplificación óptica. Se obtienen al dopar el núcleo de fibras ópticas con iones de elementos químicos, pertenecientes al grupo conocido como de tierras raras (Er^{3+} , Tm^{3+} y Pr^{3+}). El nivel de dopante en el interior de la fibra dependerá del tipo de amplificador y la elección del dopante utilizado se hará dependiendo de en que longitud de onda se quiera trabajar.

El praseodimio (Pr^{3+}) se utiliza para aplicaciones en torno a 1310 nm, para la ventana de 1450-1500 nm se recurre a iones de tulio (Tm^{3+}) y por último el erbio (Er^{3+}) que cubre el rango de 1500-1600 nm. Existen otros elementos químicos con los que se dopan los núcleos de fibras para obtener láseres de fibra como son: el iterbio (Yb) y el neodimio (Nd). Dichos elementos tienen isótopos estables como son el ^{174}Yb y el ^{142}Nd , de los cuales los productos de desintegración primarios anteriores al ^{174}Yb son isótopos del elemento tulio y el principal producto de desintegración del ^{142}Nd es el praseodimio, que los hemos mencionado anteriormente.

2.2.2. Fibra de cristal fotónico

Las fibras de cristal fotónico son unas nuevas clases de fibras basadas en las características del cristal fotónico. Están formadas por un núcleo rodeado de una estructura regular de huecos a lo largo de la fibra que provoca una variación periódica del índice de refracción de la misma. Esta configuración proporciona a la fibra propiedades de guiado de luz diferentes a las fibras convencionales. La propiedad más importante de estos cristales es que pueden existir rangos de frecuencia en los que la propagación de la radiación electromagnética no está permitida (band gaps). Por esta razón son interesantes a la hora del diseño de láseres.

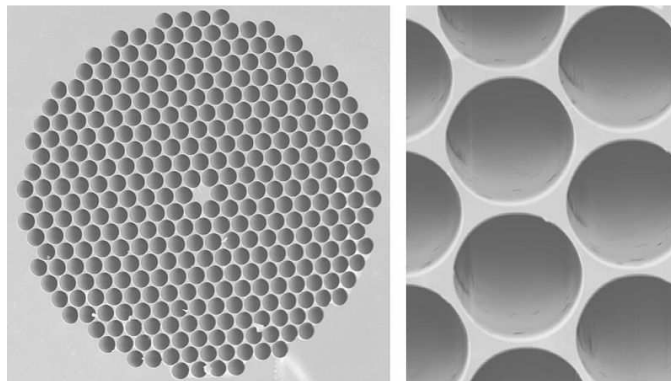


Figura 2.9. PCF con diámetro del núcleo 5 μm y núcleo de los agujeros 4 μm

En la siguiente figura se puede ver una sección de una PCF y los parámetros principales de su diseño como son: diámetro del núcleo (D), diámetro de los huecos (d) y periodo de la red o distancia entre los centros de dos huecos consecutivos (Λ).

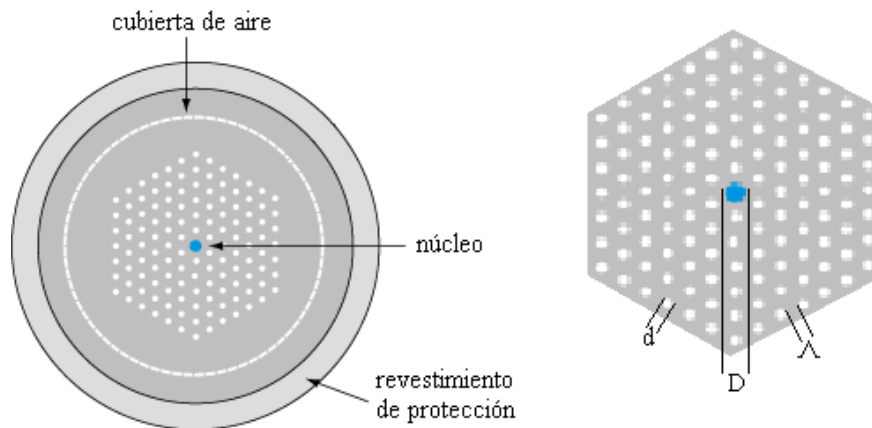


Figura 2.10. Sección transversal de una PCF

Las fibras de cristal fotónico pueden dividirse en dos modos de operación, de acuerdo a su mecanismo de confinamiento. Se pueden diferenciar las fibras con núcleo sólido, el cuál provocará un aumento del índice de refracción con respecto a los huecos, y por otro lado las fibras con núcleo hueco, cuyo caso es justo el contrario.

Para el primer caso las PCF con núcleo sólido, estas tienen un comportamiento similar a las fibras convencionales, pero consiguen confinar de una forma más eficiente la luz en su núcleo. En la siguiente figura 2.11. se puede ver un esquema del confinamiento. Como la luz que se dirige hacia la cubierta se encuentra con índices de refracción menores (huecos) que la obligan volver al núcleo. Son buenas para aplicaciones con dispositivos ópticos no lineales y con fibras que mantienen la polarización.

En el segundo caso, con núcleo hueco la mayor parte de la luz se guía a través del aire, por lo que existe poco solapamiento entre la sílice y los modos propagados, consiguiendo reducir las no linealidades y así soportar la transmisión de mayores potencias frente a las fibras convencionales.

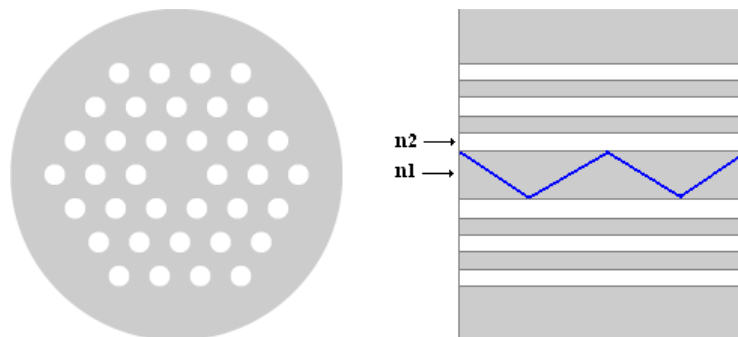


Figura 2.11. Efecto de confinamiento de la luz en el núcleo en una fibra cristal de fotónico

2.2.3. Fibra de cristal fotónico dopada con erbio

Las PCF son interesantes en el desarrollo de estructuras avanzadas para láseres de fibra y como estos necesitan amplificación se optará por dopar dichas fibras con erbio, obteniendo así las ventajas de las fibras dopadas con tierras raras y las de las de cristal fotónico, y también nuevas mejoras por el hecho de combinar características de ambas.

Una mejora que se obtiene, es que los band gaps característicos de las PCF hacen que disminuya la emisión espontánea (propia del erbio), consiguiendo así reducir el ruido que genera la misma.

2.2.4. Fibra altamente birrefringente

Son un tipo de fibra de mantenimiento de polarización [1,2]. La birrefringencia se debe a la pérdida de simetría en el índice de refracción (n) del núcleo de la fibra, como causa de cambios moleculares del material (anisotropía) y/o pérdida de la geometría circular del propio núcleo de la fibra óptica. En la siguiente figura se ilustra este concepto, donde cada eje determina un índice de refracción máximo (n_{\max}) y otro mínimo (n_{\min}).

El eje asociado a n_{\min} se denomina eje de birrefringencia rápido y n_{\max} eje lento. Existen diferentes motivos por los que una fibra óptica puede perder su geometría circular, como: esfuerzos en el proceso de fabricación e instalación durante su vida útil, contracción y dilatación debido a cambios de temperatura, tensiones, curvaturas, etc.

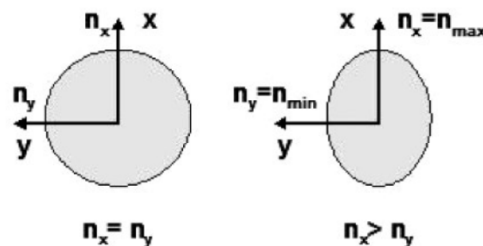


Figura 2.12. Sección transversal del núcleo de una fibra óptica en la que se aprecian dos casos de geometría: circular y elíptica. Son casos de un material no birrefringente y birrefringente, respectivamente

El efecto neto de la birrefringencia es inducir un retardo entre los dos modos de polarización. Este retardo es conocido como *DGD*, denotado comúnmente como “ $\Delta\tau$ ” y se mide en picosegundos (ps). La figura 2.14. muestra este efecto: se introduce un pulso óptico con una polarización distinta al de los ejes de birrefringencia, el cual se descompone en dos pulsos que viajan independientemente a distintas velocidades de grupo, llegando al final de la fibra óptica en distintos tiempos, produciendo un ensanchamiento del pulso óptico total.

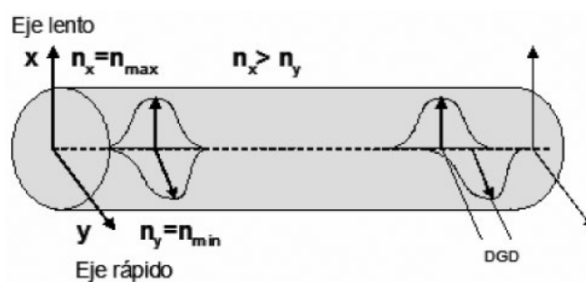


Figura 2.13. Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente

El ejemplo anterior muestra que las direcciones de los ejes de birrefringencia se mantienen constantes a lo largo de toda la fibra óptica. Esto sólo es cierto para el caso de las fibras PM Hi-Bi (*Polarization Maintaining Highly Birefringent*). Que son las que se usaran en el desarrollo de este proyecto.

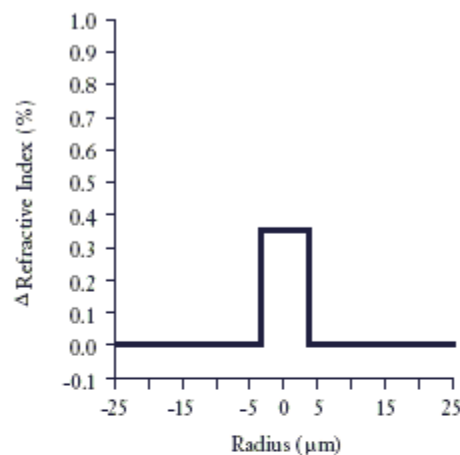
2.2.5. Fibra monomodo SMF

Como su nombre indica en estas fibra sólo se propaga un modo por lo que se evita la dispersión modal, debido a la diferencia de velocidad de propagación de los modos que se transmiten por la fibra. Esto se debe al pequeño tamaño de su núcleo menos de 9 μm . A su vez esto dificulta el acoplamiento de la luz, pero permite alcanzar mayores distancias y tasas de transmisión más elevadas que la fibra óptica multimodo.

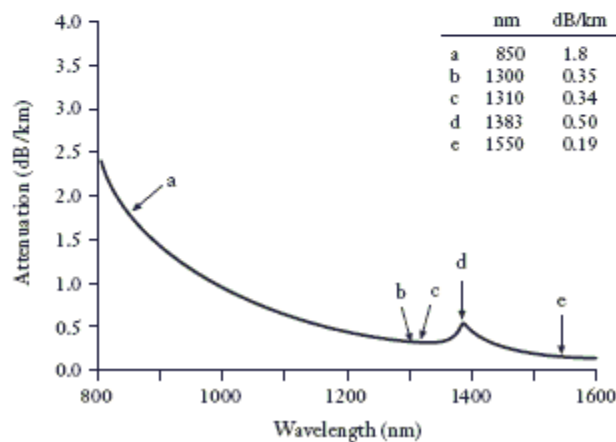
La fibra monomodo o estándar, conocida por sus siglas en inglés SMF (Standar Single Mode Fiber), tiene como características más destacadas una atenuación de unos 0,2 dB/km y una dispersión cromática de 16 ps/km·nm en 3ª ventana (1550 nm). En la segunda ventana la dispersión es nula pero la atenuación es mayor, casi el doble que en 3ª ventana [3].

Las siguientes gráficas muestran el perfil de su índice de refracción y la curva de atenuación con la longitud de onda.

Refractive Index Profile (typical fiber)



Spectral Attenuation (typical fiber)



2.3. DISPOSITIVOS ÓPTICOS

2.3.1. Optical Add - Drop Multiplexers (OADM)

Optical add-drop multiplexer (OADM) son dispositivos ópticos que se usan en el multiplexado/división y enrutamiento de diferentes canales ópticos, dentro o fuera de una fibra monomodo (single mode fiber SMF).

El dispositivo Add-drop multiplexer refleja un canal de los que llegan a su entrada y transmite los otros por su salida. Para extraer un canal, se pasa la señal óptica a través del dispositivo que tratará de forma diferente la longitud de onda de operación del mismo respecto de las restantes, como un filtro de selección de longitud de onda. Como veremos más adelante utilizaremos el hecho de que se comporte como un banco de filtros, para el desarrollo de una estructura láser multilínea de fibra óptica.

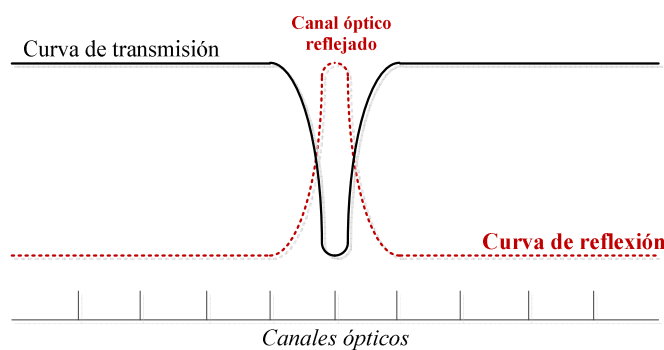


Figura 2.15. Curvas de transmisión y reflexión de los canales ópticos de un OADM

En la siguiente figura, se ve un esquema básico del funcionamiento de un OADM, en el que tenemos a la entrada del dispositivo tres longitudes de onda distintas (λ_1 , λ_2 y λ_3), éstas pasan a través del circulador óptico para llegar al FBG donde rebotará solo una longitud de onda concreta y saldrá por el puerto *drop*. El resto serán transmitidas por el puerto de salida, con o sin añadir una nueva longitud de onda (o la misma pero tratada) por el puerto *add*. Podemos ver que se compone de cuatro puertos: in, out, add y drop.

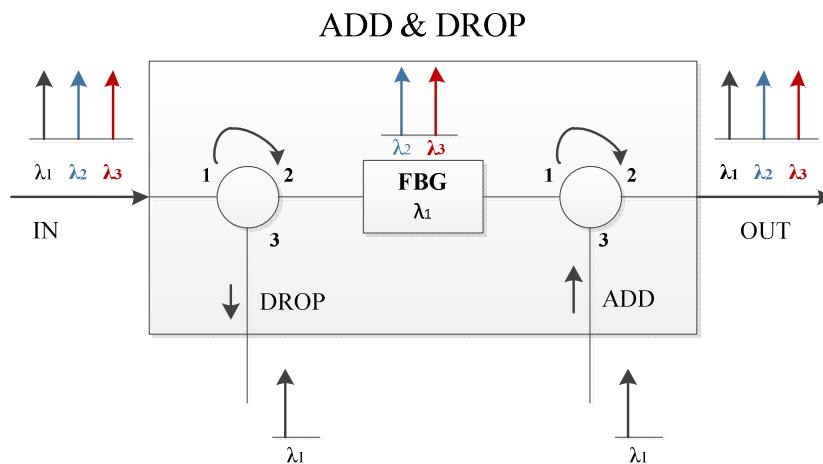


Figura 2.16. Optical add-drop multiplexer, usando FBG y dos circuladores ópticos

Reconfigurable optical add-drop multiplexer ROADM, se definen así por que no tiene que ser la misma longitud de onda introducida en *add*, la sacada por *drop* [4,5].

2.3.2. Multiplexadores (MUX) y Demultiplexadores (DMUX)



Figura 2.17. Fotografía de un MUX-DMUX comercial

Este tipo de dispositivos se utilizan para combinar diferentes señales ópticas (MUX) o para separarlas (DMUX). Esto es interesante ya que los receptores responden por igual, independientemente de la longitud de onda que reciban.

Un factor importante en su forma de operación es la densidad óptica del canal. Existen dos clases principales: Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM) que se basan en un tamaño de canal de 200 GHz o menos. Y Coarse Wavelength-Division Multiplexing (CWDM) con un espacio por canal de 20 nm. El primer tipo está en unidades de frecuencia y el segundo en longitudes de onda (nanómetros), debido a que el primero es uniforme para frecuencia y no en longitud de onda y viceversa con la segunda clase de dispositivo. Los dispositivos CWDM son más sencillos y reducen los costes, pero los DWDM a pesar de aumentar el coste permiten tener un BW mayor, algo importante en las largas distancias o donde el número de fibras disponibles es limitado. Son utilizados para diversas aplicaciones, por sus diferentes características [4,5].

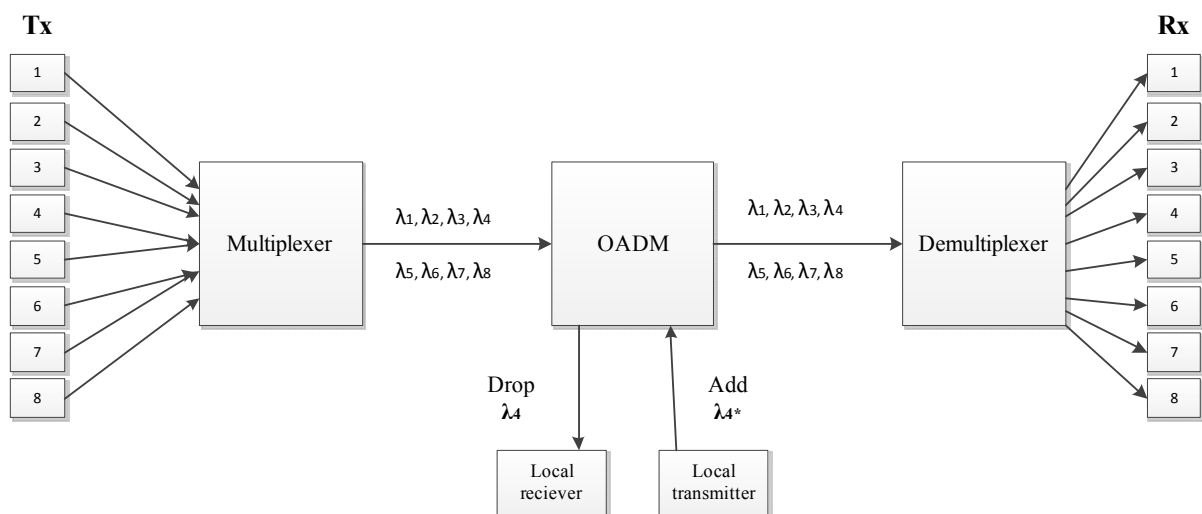


Figura 2.18. Un sistema WDM y sus elementos básicos, se extrae la longitud de onda 4

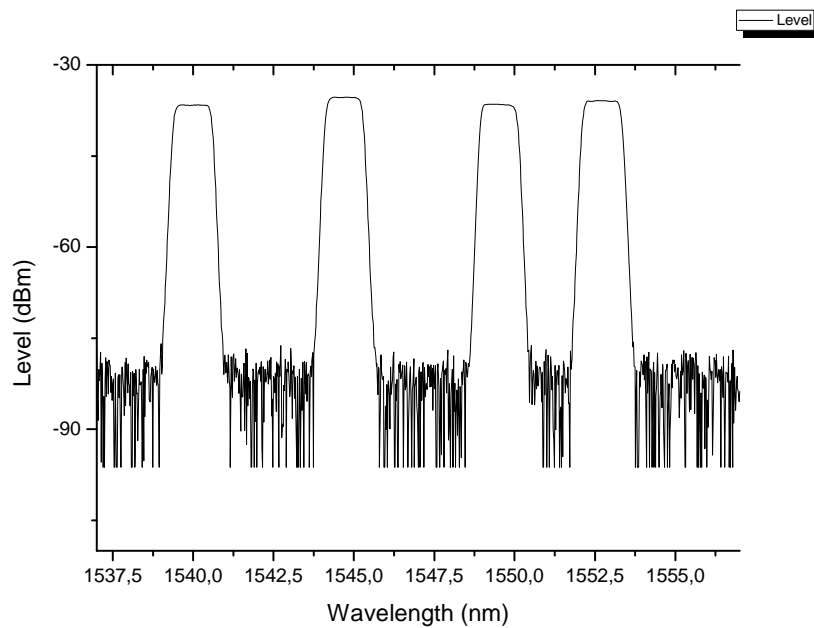


Figura 2.19. Espectro MUX y DMUX interconectados

2.3.3. Filtro sintonizable

Un filtro sintonizable, es aquel con el que se introducen pérdidas muy elevadas para todas las longitudes de onda excepto en una pequeña región, que se puede controlar mediante un tornillo micrométrico. Cuando empieza la emisión láser, con este filtro se consigue que ninguna longitud de onda (salvo las que permite el filtro) tenga la ganancia suficiente como para superar las pérdidas. Por lo tanto, se tendrá un láser sintonizable simplemente con cambiar la posición del filtro.

Como se observará en las gráficas (y como ya se ha explicado en la introducción), de esta forma podremos sintonizar la salida del láser en un rango continuo. La potencia que se obtiene en el máximo de señal óptica de salida es en los dos casos semejante. Más adelante, cuando el láser esté montado, se volverá sobre esta idea.

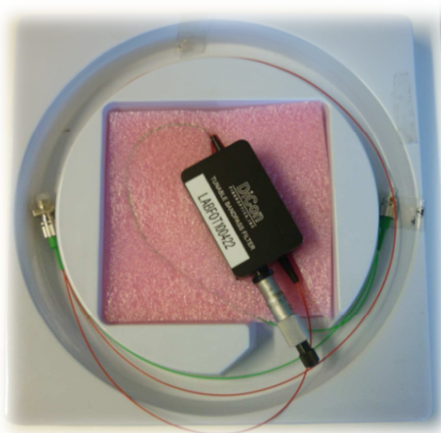


Figura 2.20. Fotografía del filtro sintonizable

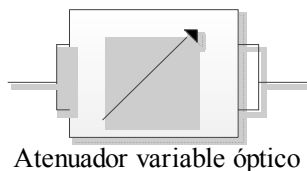
2.3.4. Atenuadores ópticos

El uso de atenuadores ópticos, ayuda a aumentar la operación de los equipos ópticos, ya que proporcionan estabilidad y ecualización a los sistemas.

El atenuador es un elemento de suma importancia en el montaje. En esencia, es un mecanismo que introduce unas pérdidas a la cavidad (mediante un tornillo micrométrico se controlan dichas pérdidas) y con ello se cambia la condición de ganancia del anillo, lo que cobra especial relevancia a la hora de conseguir emisión multilínea.

Los atenuadores son un tipo de filtro óptico, es importante diferenciarlos, ya que afectan a todas las longitudes de onda por igual. Estos reducen el nivel de señal óptica, transmitiendo solo una fracción de la luz de entrada.

Existen principalmente dos categorías de atenuadores, los fijos y los variables. Cuando no se sabe el nivel de atenuación que se necesita, se utiliza el atenuador variable (en nuestro caso de control manual), el cual ayuda a determinar de manera precisa el valor de atenuación que requiere el equipo.



Generalmente este tipo de dispositivos lo que hacen es absorber la potencia extra; ya que si la reflejasen la luz indeseada generaría ruido en nuestro sistema.

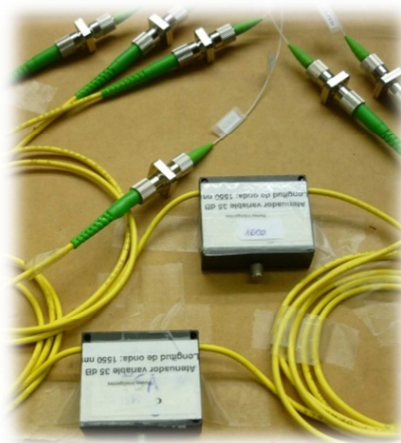


Figura 2.21. Fotografía de un atenuador variable

2.3.5. Acopladores

Surgen debido a la necesidad de distribución de múltiples señales ópticas. Dispone M entradas (típicamente 1 ó 2) y N salidas (2, 4, 8, 16, 32, 64), están diseñados para introducir pérdidas de inserción (P.I) aproximadamente iguales para cada una de sus ramas, también se caracterizan con las pérdidas de retorno (P.R).

Las características principales de los mismos son:

- Relación de acoplo
- Pérdidas de inserción
- Número de puertos de entrada y de salida
- Direccionalidad
- Selectividad de la longitud de onda
- Tipo de transmisión: monomodo o multimodo
- Sensibilidad a la polarización y pérdidas de polarización



Figura 2.22. Fotografía de un acoplador comercial

También existe un parámetro que caracteriza las pérdidas, llamado pérdidas en exceso:

$$Excess Loss (dB) = -10 \log \left(\frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_n)}{P_{input}} \right)$$

La división de la señal no tiene por qué ser idéntica para cada una de las ramas, como veremos en las estructuras desarrolladas en el capítulo 4 donde utilizaremos acopladores 90:10, 70:30 o variable. Los acopladores son sensibles a la dirección de propagación de la luz, aunque la mayoría son dispositivos bidireccionales [4,5].

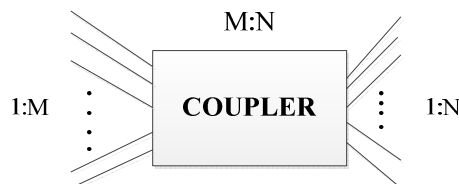


Figura 2.23. Acoplador M : N

2.3.6. Aisladores

Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Su importancia en los sistemas de fibra óptica se debe a que detienen la reflexión y la dispersión de la luz, evitando que alcancen a elementos sensibles, particularmente láseres.



Su operación depende generalmente de materiales llamados rotadores de Faraday, los cuales provocan una rotación en la polarización de la luz debido al efecto Faraday. Donde el ángulo de rotación β es siempre el mismo y viene determinado por: $\beta = vBd$; en donde v es la constante de Verdet del material y d la longitud del rotador.

En el siguiente ejemplo gráfico se puede apreciar como esta característica es capaz de permitir el paso de la luz en una única dirección.

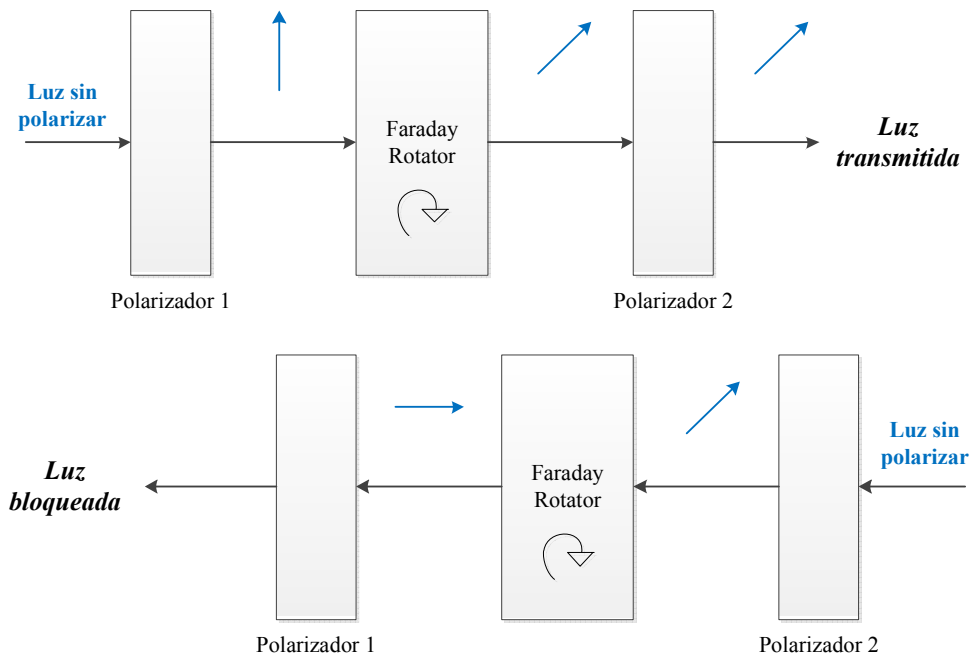
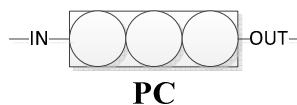


Figura 2.24. Gráfico de funcionamiento de un aislador

Este diseño tiene el problema de que la mitad de luz (ya sea horizontal o vertical) es desechada, lo que suponen 3 dB de pérdidas. Existen otros diseños más complicados y refinados, que logran evitar dicho problema.

2.3.7. Control de polarización

Es un elemento óptico que permite modificar el estado de polarización de la luz, es típico un manejo manual. Un controlador de polarización puede tener la tarea de transformar una polarización fija conocida en una arbitraria, aunque lo más general es la transformación de una polarización arbitraria en otra polarización arbitraria.



Dicho dispositivo puede obtenerse por ejemplo colocando en el camino óptico tres placas giratorias en cascada: una primera placa de $\lambda/4$ que está orientada a transformar la polarización elíptica incidente en polarización lineal, una placa $\lambda/2$ que transforma esta polarización lineal en otra polarización lineal, y de nuevo una segunda placa de $\lambda/4$ que transforma la otra polarización lineal en la polarización elíptica deseada a la salida.

También pueden implementarse con óptica de espacio libre, en ese caso la luz sale de la fibra pasa a través de las tres placas, que pueden girarse con total libertad para permitir un ajuste de polarización y luego entra en la fibra. Otro modo de polarizar la luz, es mediante la aplicación de un estrés controlado a la propia fibra.

2.3.8. Redes de difracción en fibra (FBG)

Una red de difracción clásica de óptica de volumen es una superficie reflexiva con una serie de líneas, o surcos, paralelas, las cuales provocan que la luz incidente se refleje con diferentes ángulos de salida en función de la longitud de onda.

Se puede desarrollar una red de difracción en el núcleo de una fibra óptica (FBG) provocando una variación periódica de su índice de refracción. Estas variaciones en el índice de refracción de la fibra provocan la refracción de la luz, el llamado efecto Bragg. La dispersión de Bragg no es exactamente igual al fenómeno de la difracción en una red de difracción. Un FBG tiene la propiedad de reflejar selectivamente una banda de frecuencias estrecha centrada en la longitud de onda de Bragg, λ_B . Ésta longitud de onda es proporcional al periodo de variación del índice de refracción, Λ , y al índice de refracción efectivo de la guía de onda.

$$\lambda = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$$

Cada vez que la luz atraviesa una zona con un índice de refracción más grande, parte se refleja hacia atrás. Si la longitud de onda coincide con la separación de las regiones de la fibra con un índice de refracción mayor, la onda reflejada en cada una de estas zonas forma una interferencia constructiva, como se muestra a continuación.

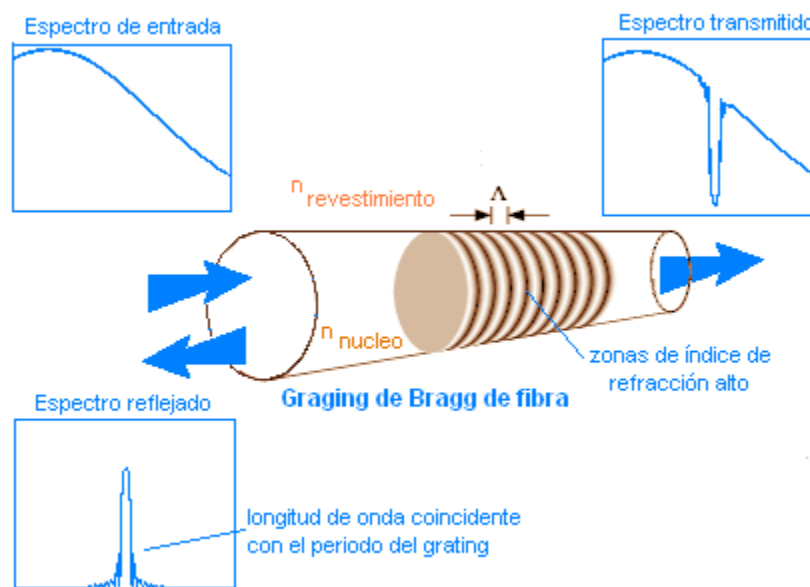


Figura 2.25. Los FBG de fibra reflejan las longitudes de onda de la luz que coinciden con el periodo del grating y dejan pasar el resto de longitudes de onda

Se diferencian tres tipos de FBGs periódicos: uniforme, apodizado y chirpeado [4,5 y 6].

2.3.9. Circulador óptico

El circulador es un dispositivo con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Como se muestra en el siguiente esquema la luz que entra por el puerto 1 se dirige al puerto 2 y entra por el puerto 2 se dirige al 3.

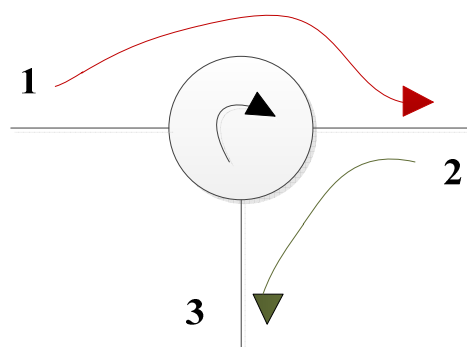


Figura 2.26. Circulador óptico

En la siguiente figura se muestra el esquema de un circulador de cuatro puertos, 3 de ellos de entrada/salida y el cuarto sólo de salida. El funcionamiento de este esquema se basa en el visto para el aislador óptico independiente de la polarización de la señal de entrada. Éste está formado por rotadores de Faraday, láminas en $\lambda/2$ y SWP *Spatial Walk-off Polarizator*. Como puede observarse la señal que entra por el puerto 1 se dirige únicamente al puerto 2, la señal que entra por el puerto 2 se dirige al 3 y así sucesivamente.

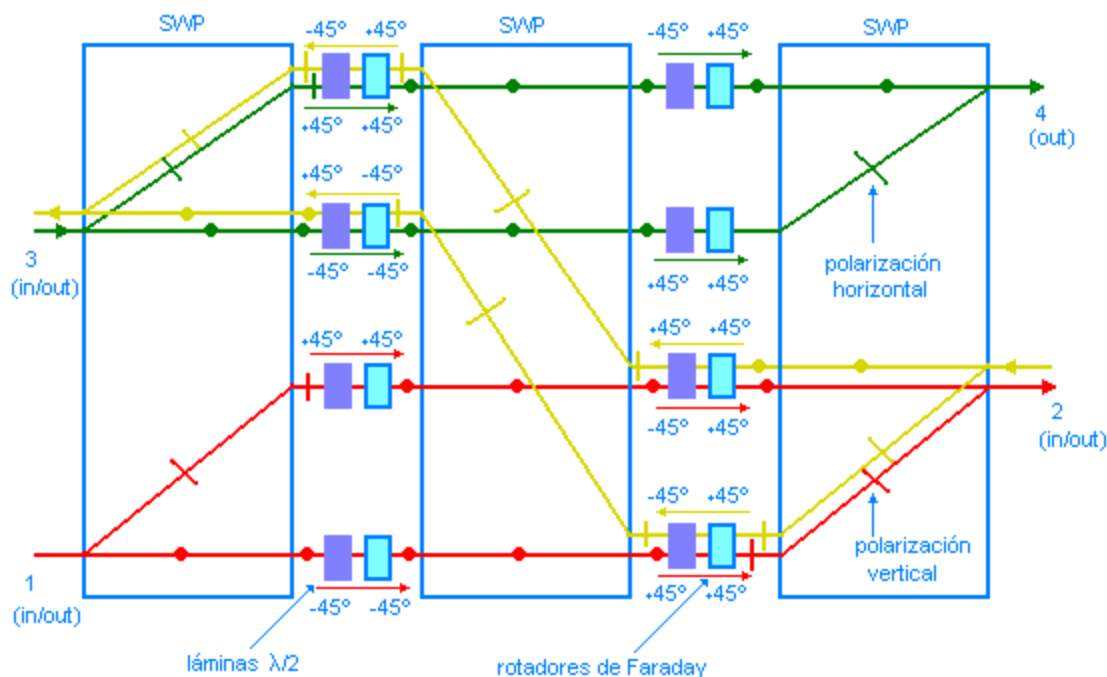


Figura 2.27. Esquema de un circulador

3. EL LÁSER

En este tercer capítulo llevaremos a cabo un estudio de los láseres de fibra. Este tipo de láseres se pueden lograr introduciendo un amplificador de fibra en una cavidad recirculante, como veremos y utilizaremos en los láseres desarrollados durante este proyecto. Antes de continuar, se realizará una breve exposición del desarrollo histórico que han seguido los láseres de fibra.

Antes de los años 60 ya se conocía la capacidad de amplificación de luz de las tierras raras. En 1960 ya se había propuesto el máser óptico y se había demostrado el efecto láser. En 1961 *Snitzer* propuso usar una fibra óptica como medio amplificador y como cavidad resonante. Durante los años posteriores se siguió avanzando en esta idea, pero las fibras utilizadas presentaban muchas pérdidas. A mediados de los 80, cambios en los procesos de fabricación permitieron, por una parte, una gran disminución en las pérdidas de propagación y, por otra, incorporar iones de tierras raras en el núcleo.

En 1985 un grupo de la Universidad de Southampton consiguió el primer láser de fibra usando neodimio. Se observó que el ion de erbio trabaja mejor en la tercera ventana, la ventana de transmisión con menos pérdidas en las fibras basadas en silicio. A pesar de constituir un sistema láser de tres niveles, una vez puesto en forma de fibra el erbio permite confinar una gran potencia en poco espacio, por lo que se consigue una alta densidad de energía logrando amplificación con potencias de bombeo muy bajas.

El primer láser con fibra dopada con erbio lo realizó el mismo grupo de Southampton en 1986. Fue el primer láser de tres niveles operando en modo continuo a temperatura ambiente que se consiguió, lo que indicaba el potencial de estos láseres.

Llegados a este punto, habría que destacar que se ha encontrado abundante material publicado acerca de los láseres multilínea. Este hecho hace pensar que el tema presenta claras expectativas de desarrollo [7, 8, 9 y 10].

3.1. Tipos de láseres según el medio de ganancia

Existen diversos tipos de láseres de fibra según el método de ganancia utilizado para su obtención. Entre los cuales cabe destacar tres de ellos: láseres de fibra Raman (RFL), láseres de fibra Brillouin (BFL) y láseres de fibra dopada con erbio (EDFL).

Nosotros nos centraremos en este último caso, ya que será el medio principal de ganancia utilizado en la realización de este PFC.

Láseres de fibra dopada con erbio (EDFL)

Los láseres de fibra dopada con erbio (Erbium doped fiber Lasers, EDFLs) pueden operar en un amplio rango de longitudes de onda desde el visible hasta el infrarrojo, pero como hemos mencionado antes la zona óptima de operación es la de la tercera ventana de las comunicaciones ópticas, al contar con la menor atenuación.

En el capítulo 2 de esta memoria se vio que los EDFLs precisan de un bombeo externo a 980nm o bien a 1480nm. Para esta función existen diversos láseres de semiconductor orientados únicamente al bombeo de fibras dopadas con Erblio como el de la figura 3.1, que es con el que hemos trabajado mayormente en el laboratorio.



Figura 3.1. Láser Amonics a 980nm

La mayoría de los láseres diseñados utilizan bombeo a 980 nm en vez de 1480 nm, debido a la mayor eficiencia del primer caso [11].

La principal ventaja que hace que los EDFL sean los más empleados es la menor potencia necesaria de bombeo, de unos centenares de mW por los 1~4 vatios del caso de la amplificación Raman. Además una segunda ventaja interesante que presentan es la posibilidad de diseñar láseres muy cortos, con lo que se reduce el número de modos longitudinales del láser, como se verá más adelante.

3.2. Tipos de láseres según el método de generación de las longitudes de onda

A parte de lo comentado anteriormente relacionado con el tema de la ganancia, los láseres de fibra requieren algún sistema para la selección de las posibles longitudes de onda que obtengan la condición de láser. Los métodos para conseguir dicha selección que se han desarrollado en este PFC, son tres. Cada uno correspondiente a cada una de las tres estructuras desarrolladas para láseres multilínea de fibra óptica.

En el primer sistema desarrollado utilizaremos los dispositivos ópticos Optical Add & Drop Multiplexers (OADMs) colocados en cascada, como filtro de nuestra estructura. Del mismo modo contaremos con la ayuda de un interferómetro Sagnac (que se compone de una fibra altamente birrefringente Hi-Bi y un PC), para lograr reducir aún más la anchura del láser que obtenemos y también así podremos realizar varios estudios con diversas longitudes de fibra Hi-Bi.

Utilizamos OADMs debido a dos razones principalmente: la primera es que son un dispositivo comercial en pleno auge, cada vez con costes más reducidos. Siendo la segunda el carácter innovador de su uso en estos fines y con ello obtener ventaja a su vez de la primera razón mencionada.

Para el segundo caso de estudio los dispositivos ópticos empleados para tal tarea serán MUX-DMUXs, que tienen una funcionalidad equivalente a los OADMs en el sistema anterior, pero a la que se le une el hecho de no introducir pérdidas en el propio sistema a la hora de combinar y/o separar las señales ópticas. Se combinara junto con el interferómetro Sagnac, por el mismo motivo comentado previamente. Ésta estructura compartirá las dos razones previamente expuestas para su uso.

En el tercer y último sistema que desarrollaremos en este PFC, utilizaremos fibras espejadas en sus finales con el fin de crear más de una cavidad óptica dentro del mismo. Con el hecho de tener más de una cavidad óptica lo que conseguiremos es una supresión de modos longitudinales con emisión de línea. De éste tipo de estructuras unas de las más conocidas son la Michelson y la Fox-Smith.

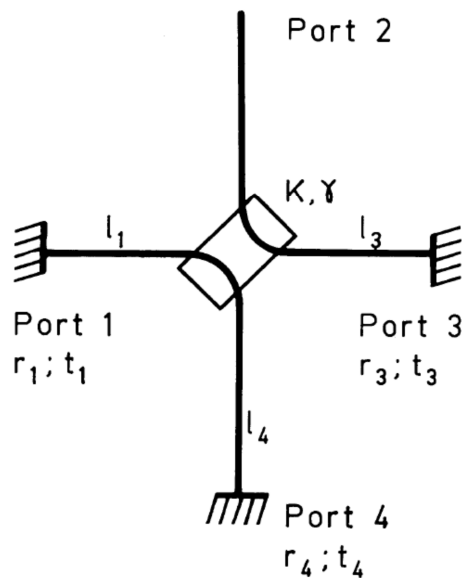


Figura 3.2. Resonador Fox-Smith

La mayoría de resonadores están formados por una única cavidad y su intensidad de salida esta descrita por la función de *Airy*. Sin embargo en esta estructura con más de una cavidad esto no será así, en donde a la salida se podrán apreciar más de un periodo, como demuestran algunos estudios que se han llevado a cabo [12].

Dentro de estos sistemas algunos de los modos de resonancia son de alta intensidad y algunos están prácticamente ausentes. Una de las características más importantes del resonador con múltiples cavidades es que puede ser diseñado para suprimir todos excepto unos pocos modos espectrales. En la parte experimental de este PFC quedará demostrada la supresión de modos longitudinales como así lo suponía la teoría en este tipo de estructuras de resonador.

La supresión modal es importante para el estrechamiento de láseres de línea, pero también podría encontrar aplicaciones en el filtrado y en el análisis espectral.

Los láseres que se crearan en este proyecto utilizaran fibra fuertemente dopada con erbio (Er-80). Ésto difiere de láseres Fox-Smith desarrollados en el artículo que sirve como base teórica de nuestra investigación, luego nuestra estructura se comportará de forma diferente.

A continuación se detallarán con más profundidad algunas características de los láseres, que serán claves en el proceso de desarrollo de nuestras estructuras. Para poder obtener láseres multilínea de fibra óptica con las propiedades que buscamos.

3.3. Limitaciones y características de los láseres

3.3.1. Forma de la ganancia

El comportamiento de la ganancia del medio amplificador resulta un parámetro muy relevante en cuanto a las limitaciones finales del láser. Dentro de este campo podemos hacer dos diferenciaciones básicas entre medio homogéneo e inhomogéneo. En la siguiente figura se pueden observar las diferencias entre ambos medios. Donde las líneas delgadas corresponden a la curva de ganancia sin saturar y las líneas gruesas a la ganancia en saturación [13].

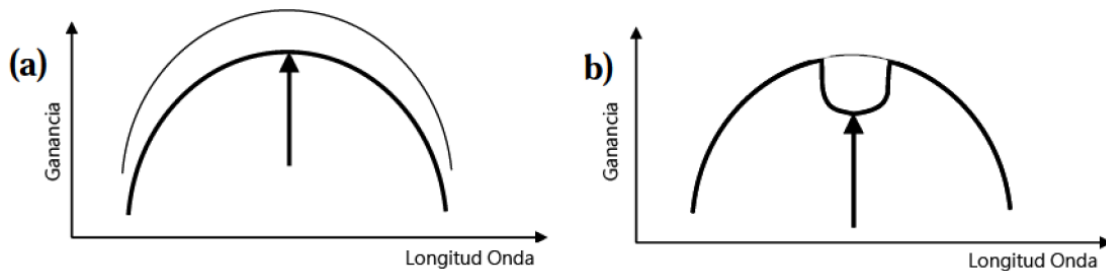


Figura 3.2. Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo (a) y un medio inhomogéneo (b)

A temperatura ambiente un EDFA tendrá un comportamiento homogéneo, siendo la principal causa de este fenómeno el tiempo de vida del estado excitado, al saturarse a una longitud de onda la energía de los estados excitados se reduce provocando una reducción de la emisión espontánea. Esto es un problema para la generación de EDFLs con múltiples longitudes de onda (multilínea), ya que las variaciones de amplitud de una de ellas modificará la curva de ganancia del amplificador y por lo tanto estará afectando directamente a la amplitud del resto de longitudes de onda provocando inestabilidades. Sin embargo es posible conseguir que un EDFA se comporte de forma inhomogénea enfriando la fibra dopada.

La amplificación Raman por otro lado se comporta como un medio inhomogéneo por lo que permitirá conseguir láseres multilínea con mayor estabilidad a temperatura ambiente. Sería interesante mencionar que existen regiones del espectro en las que no se consigue obtener emisión láser multilínea. En particular para el caso que más nos interesa en este PFC, el espectro de ganancia del erbio, esto ocurrirá en el pozo que hay cerca de 1540 nm. La razón por la que en esta zona es más difícil obtener la condición de láser, es debido a la menor ganancia que presenta el Erblio en dicha zona en comparación con el resto de su espectro de ganancia.

3.3.2. Spatial hole burning

El spatial hole burning (SHB) es un proceso que se da en los láseres de fibra en anillo. Es una distorsión o deformación de la forma de la ganancia (o pérdidas en el espectro de un medio absorbente saturable), causado por los efectos de una onda estacionaria que se genera.

Si se superponen dos señales ópticas de BW estrecho, que viajan en ambos sentidos dentro del anillo, estas formarán un patrón denominado interferencia de onda estacionaria, cuyo período es la mitad la longitud de onda. Y en un medio de ganancia láser, tendrá dos efectos importantes:

- La ganancia está saturada preferentemente en los antinodos.
- La amplificación resultante está dominada por la densidad de excitación en dichos antinodos, los nodos no son "vistos" por la señal óptica.

Este proceso es causante de inestabilidades en las estructuras de láseres. Para solucionar este tipo de problemas bastaría con impedir la circulación de las señales en ambos sentidos, mediante aisladores o circuladores ópticos.

Del mismo modo, el espectro de la pérdida de un medio absorbente saturable puede obtener un chapuzón. El efecto de este último puede ocurrir por ejemplo en una fibra dopada de tierra rara y es la base para, por ejemplo, la construcción de un filtro de seguimiento automático, como a veces se utiliza en el contexto de láseres de fibra de frecuencia única.

3.3.3. Láseres multilínea (multi-wavelength)

Como el propio título de este PFC indica los láseres desarrollados en el mismo, buscan que sean multilínea, ya que uno de los objetivos actuales en el desarrollo de láseres de fibra óptica es el de obtener el mayor número de longitudes de onda posibles con condición láser. Los dos principales problemas que presentan son la ecualización de las amplitudes de cada longitud de onda y la estabilidad del sistema.

Ambas limitaciones están asociadas a la amplificación. La ecualización dependerá del reparto que se haga de la ganancia a la hora de ajustar el láser y la estabilidad a su vez dependerá del comportamiento del sistema ante oscilaciones de amplitud.

Ecualización

Como veremos en el siguiente capítulo, la ecualización de láseres de fibra óptica multilínea que se han realizado en este PFC, se ha llevado a cabo principalmente mediante el uso de atenuadores variables para cada longitud de onda. Mediante esta configuración logramos controlar la ganancia para cada canal. Pero a cambio desperdiciamos parte de la potencia de las señales, con lo que se reduce la eficiencia de la estructura.

Estabilidad

Definimos la estabilidad del sistema como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la amplitud para una longitud de onda durante un intervalo de tiempo concreto. Los EDFAs se comportan como un medio homogéneo a temperatura ambiente, lo que provoca variaciones importantes de estabilidad en los sistemas multilínea.

Un método para mejorarla que se mencionó anteriormente consiste en enfriar la fibra dopada. Además también se pueden conseguir aumentar el número de longitudes de onda simultáneas con la condición láser, ya que la ganancia se conserva en todo el espectro y no hay competencia.

3.3.4. Láseres monomodo y multimodo

Esta característica es importante a la hora del diseño de láseres de fibra, debido a que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Buscamos que el sistema sea monomodo, para obtener así mejores condiciones de estabilidad.

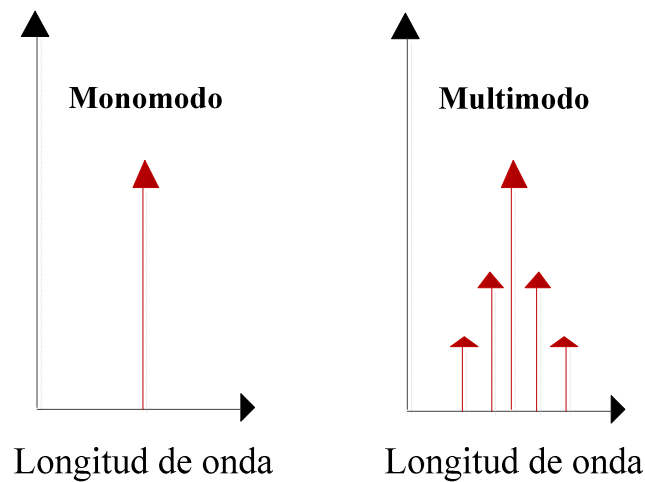


Figura 3.3. Láseres monomodo y multimodo

Como se ha comentado el objetivo es diseñar láseres multilínea que operen en un solo modo longitudinal o en su defecto con el menor número de ellos. A continuación se presentan diferentes soluciones utilizadas para este propósito.

3.3.5. Doble cavidad

Uno de los métodos para la reducción del número de modos de un láser de fibra es la configuración con doble anillo mediante acopladores, figura 3.4. de esta forma el número de modos así como su separación será diferente para cada caso.

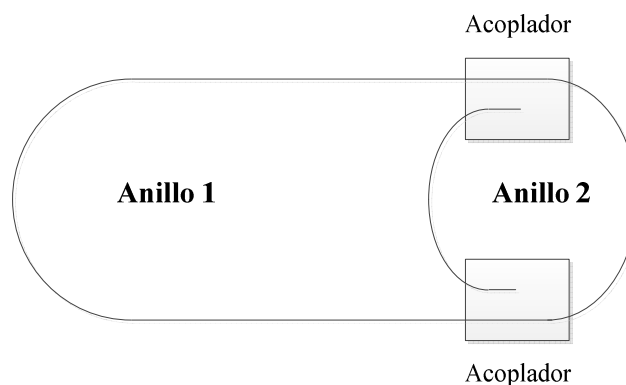


Figura 3.4. Esquema básico de una doble cavidad

Con esta configuración, la función de transferencia total de la cavidad será la multiplicación de las funciones de transferencia de cada uno de los anillos. De esta manera, si se configura de forma que solo pueda existir un único modo de resonancia, tendremos un láser monomodo.

3.3.6. Absorbente saturable

Es un método utilizado en algunos casos para lograr estabilidad en la estructura. Se basa en introducir un tramo de una determinada longitud de fibra dopada con Erblio (EDF) sin bombeo, de esta forma se comportará como un medio absorbente.

A mayor concentración de dopante, mayor será el efecto de absorción del medio, evitando con esto que algunos modos naturales de la cavidad de nuestro sistema no alcancen la condición de láser, favoreciendo así la estabilidad del mismo.

3.3.7. Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales

Este efecto se consigue mediante la ecualización del sistema a través de los atenuadores variables (VA) en cada rama del mismo, de manera que ambas longitudes de onda tengan el mismo nivel de potencia óptica de salida.

Nos aprovecharemos de este efecto en el desarrollo de nuestras estructuras y lo mediremos con la ayuda de un equipo especial (BOSA), para comprobar que sucede y estimar para que casos se da. A continuación se muestra un posible ejemplo.

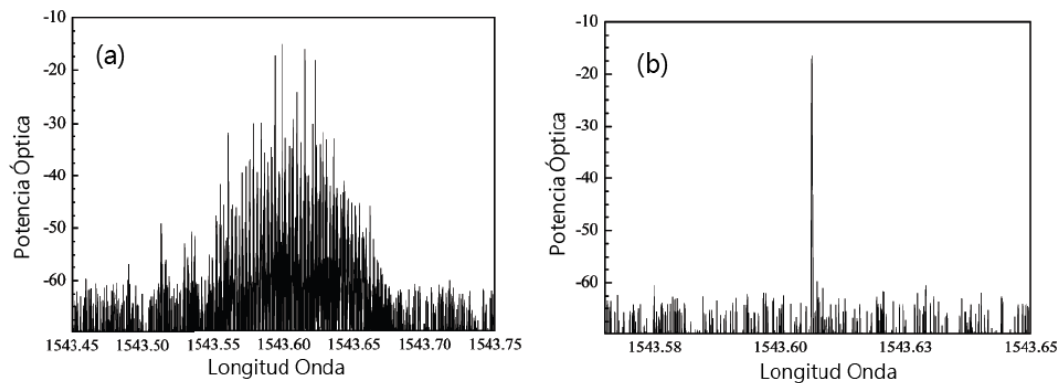


Figura 3.5. Espectro óptico salida multimodo para λ_1 (a), espectro de salida monomodo para λ_1 (b)

También se ha demostrado en este trabajo que teniendo una única longitud de onda multimodo, esta se vuelve monomodo mediante la introducción de otra longitud de onda en el sistema con el mismo nivel de amplitud.

4. PROCESO Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

A continuación se exponen tanto el proceso desarrollado, como los resultados experimentales recogidos en las sesiones de laboratorio, durante la realización de este proyecto fin de carrera. Se verán tres diferentes apartados correspondientes a cada una de las estructuras diseñadas y analizadas:

- En primer lugar se expondrá un láser multilínea usando OADM.
- Láser multifrecuencia óptica usando un interferómetro Sagnac/MUX-DMUXs.
- La estructura láser Fox-Smith/Michelson.

Los dos primeros son sistemas novedosos en su campo. Las características del equipamiento así como los elementos utilizados se detallarán en los anexos de esta memoria.

4.1. Láser multilínea usando multiplexadores ópticos Add-Drops

La primera estructura en ser analizada e implementada en el laboratorio, fue un láser sintonizable de múltiples longitudes de onda. Se trata de una novedosa configuración de un láser en anillo de fibra dopada con erbio basada en dispositivos ópticos Add-Drop, con la que conseguimos que cuatro longitudes de onda obtuvieran la condición de láser simultáneamente.

Con dicho nuevo sistema se lograron niveles de OSNR de aproximadamente 65 dB, la mejor relación que hemos encontrado en la actualidad en este tipo de configuraciones. Además entre otras ventajas de esta estructura está el hecho de esta compuesta por dispositivos comerciales y que esta adaptada a la normativa de los canales de la International Telecommunication Union (ITU).

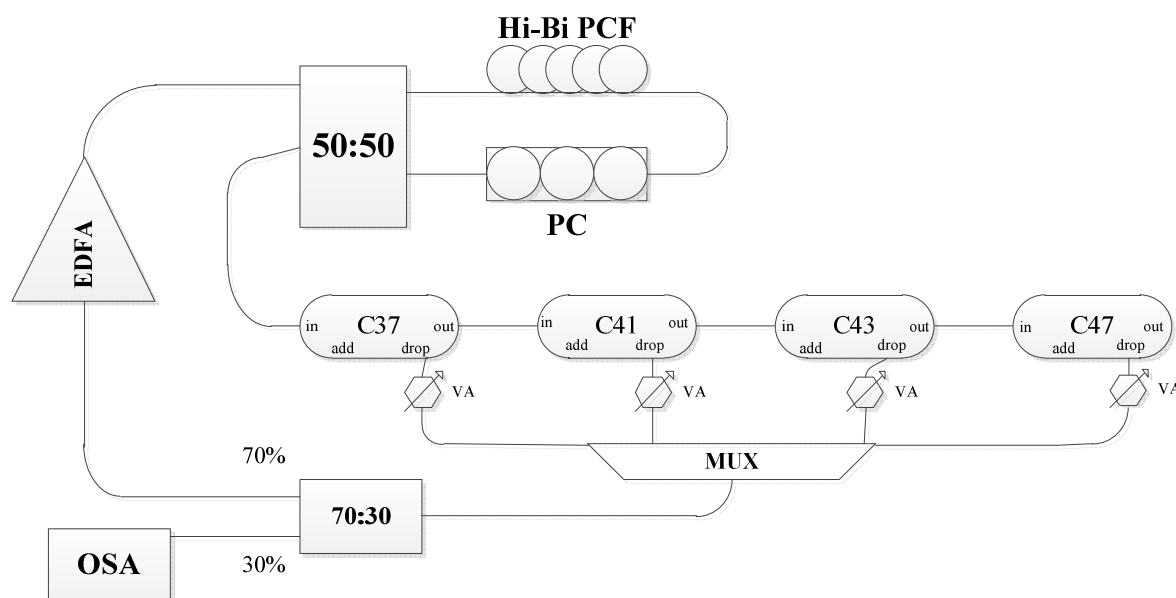


Figura 4.1.1. Láser multilínea usando OADMs

El esquema consiste en una cavidad recirculante conectada a un interferómetro Sagnac, que contiene un controlador de polarización con una sección de fibra altamente birrefringente PM

de cristal fotónico (en el caso final de 3 metros de longitud) y que usa como amplificador un equipo EDFA comercial de 21 dB de ganancia (modelo EFA-P21).

Durante las sesiones de laboratorio se utilizó un acoplador variable para optimizar al máximo el comportamiento de la estructura, pero para el láser final generado se sustituyó éste por uno comercial. Después de diferentes pruebas con un acoplador de relación de acoplo 90:10 y otro de relación de acoplo 70:30, se escogió la relación de acoplo 70:30, con la que obtuvimos mejores valores. Con él, el 70% de la potencia óptica se volvió a recircular en el sistema y el 30% restante se llevó a la salida, donde se situó un analizador de espectros ópticos (OSA).

Las longitudes de onda que alcanzan la condición de láser se corresponden con los canales de la ITU que filtran los cuatro Add-Drop de la estructura (canales: 37, 41, 43 y 47). Estos dispositivos ópticos generan cuatro ramas que aseguran que se opera de forma unidireccional en el sistema, evitando así el efecto spatial hole-burning (SHB). Cada una de estas cuatro ramas esta compuesta por el OADM y un atenuador variable óptico (VA), entre su puerto DROP y el MUX, que nos permite regular independientemente la ganancia de cada uno, haciendo el sistema más eficiente y mejorando el control del mismo. De esta manera se puede conseguir una buena ecualización de las emisiones de línea y así mejorar la estabilidad del sistema.

Después del ajuste de los atenuadores variables, se ecualizaron y se optimizaron los niveles de las longitudes de onda con emisión láser predominantes. Obteniendo al final el espectro de salida en el OSA que se aprecia en la siguiente figura.

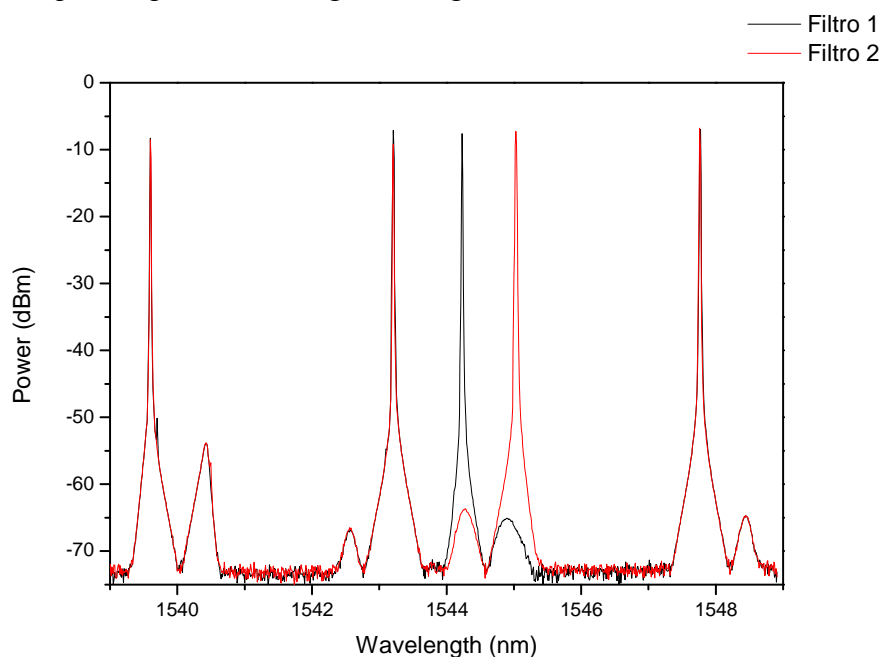


Figura 4.1.2. Filtro 1 negro, Filtro 2 rojo

La captura se tomó en el OSA (que se detalla en el anexo A.1), con la siguiente configuración: modo Adaptativo, con una resolución de 0,01 nm y un span de 10 nm.

Con esta estructura se realizó una prueba adicional en la que se colocó un filtro sintonizable a la salida (Drop) de uno de los canales con el fin de demostrar que es posible la elección del

lóbulo que conseguirá la condición de láser dentro de cada Add & Drop. Se probó colocando dicho filtro en los cuatro canales, entre el atenuador variable y el MUX, como se aprecia en la figura 4.1.3.

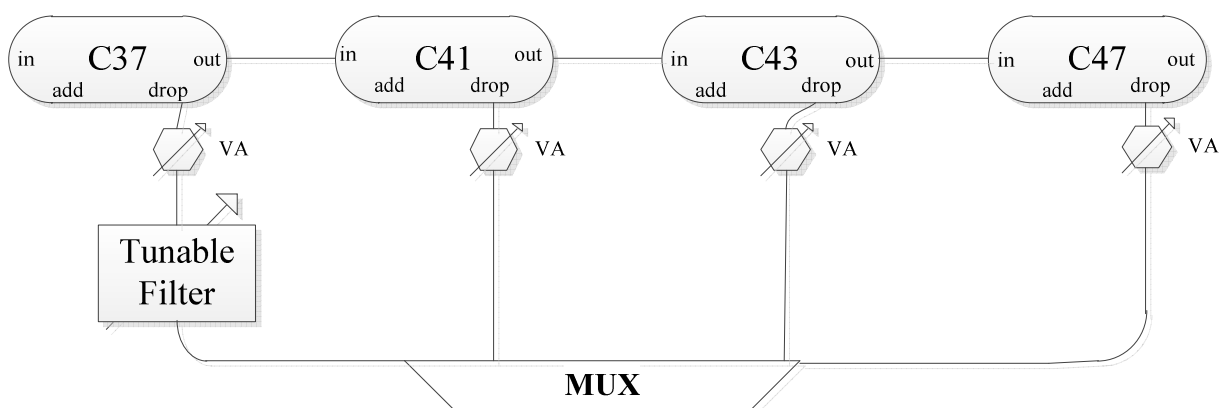


Figura 4.1.3. Estructura con filtro sintonizable

Se analizó una segunda configuración, como alternativa a la primera analizada y que se muestra a continuación. En ella se sustituyó el MUX y el acoplador 70:30 por un sólo acoplador 4x2.

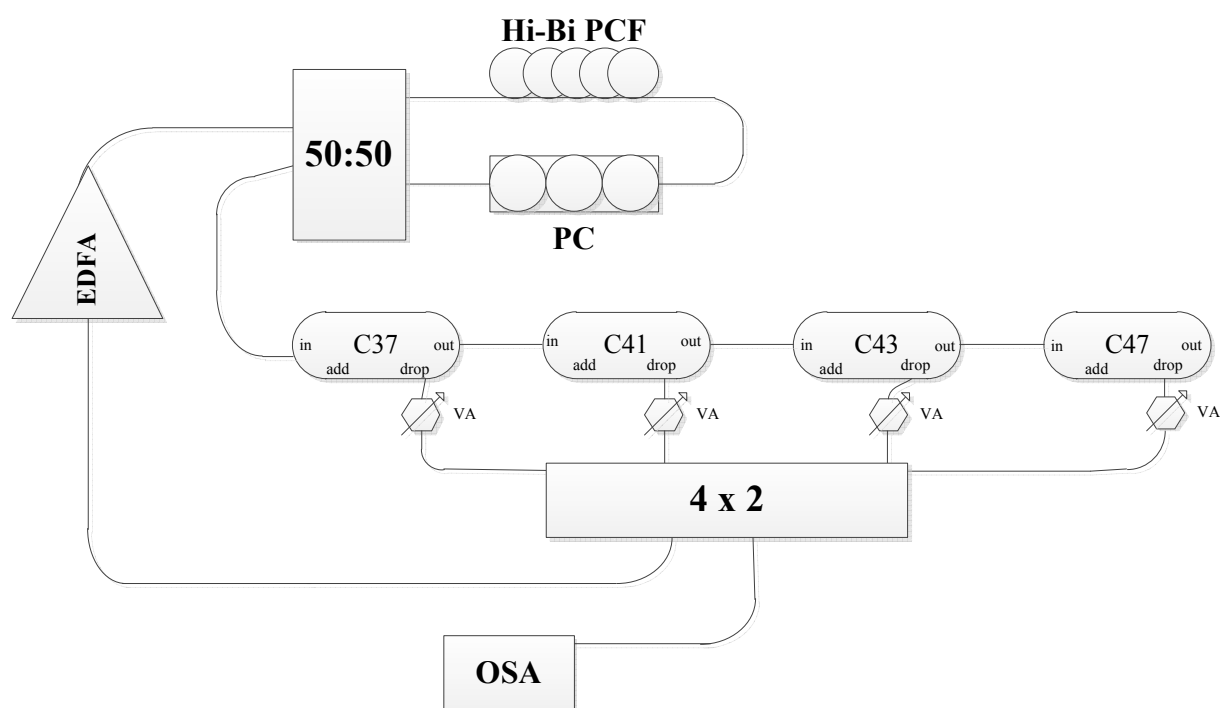


Figura 4.1.4. Láser multilínea usando OADMs y acoplador 4x2

Trás un estudio se concluyó que era mejor colocar el multiplexor, en vez de un acoplador 4x2 debido a las pérdidas que introducía este último con respecto al primer caso, resultando dicha diferencia en amplitud de unos 6 dB, lo que era de esperar pues son las pérdidas antes mencionadas que introduce el acoplador al sistema.

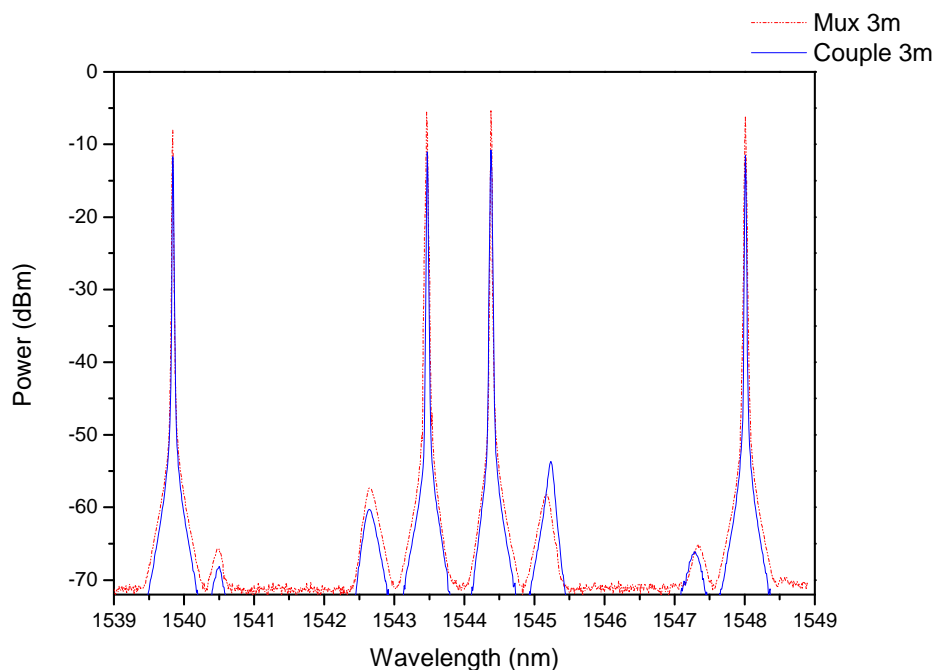


Figura 4.1.5. Comparación entre MUX y Couple (Hi-Bi de 3m)

Se han realizado medidas del sistema tanto para una fibra Hi-Bi de 3 metros, como para una de 1,5 metros, verificando para cada fibra el ajuste de la posición de los máximos así como su supresión mediante el controlador de polarización.

Durante el estudio se han llevado a cabo medidas para los cuatro Add-Drop, sin embargo para medir la estabilidad en amplitud se atenuó una de las longitudes de onda al máximo, concretamente el canal 43 (1543 nm).

Se realizaron medidas de inestabilidad con la fibra Hi-Bi de 3 metros, obteniendo los valores de las siguientes tablas:

MUX 3 λ	Medida 1			Medida 2			Medida 3		
Estabilidad	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Amplitud 100% (dB)	2,31	4,542	3,411	3,675	4,677	3,4	3,346	3,581	3,146
Amplitud 99% (dB)	2,196	4,235	2,897	2,698	4,186	2,647	3,129	3,18	2,537
Amplitud 90% (dB)	1,97	2,387	1,86	1,862	2,388	1,86	2,034	2,795	1,681
Longitud de onda (nm)	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01

Tabla 4.1.1. Inestabilidad de tres lambdas con MUX-DMUX y fibra Hi-Bi 3 metros

COUPLE 4:2 3 λ		Medida 1			Medida 2			Medida 3		
Estabilidad		λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Amplitud 100% (dB)		4,1	4	3,541	2,78	3,137	3,508	2,72	3,71	3,549
Amplitud 99% (dB)		2,946	3,686	2,52	2,694	2,981	3,2	2,656	3,655	3,439
Amplitud 90% (dB)		2,153	2,032	1,928	2	2,07	1,869	1,765	2,76	2,663
Longitud onda (nm)	de	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla 4.1.2. Inestabilidad de tres lambdas con Couple 4:2 y fibra Hi-Bi 3 metros

A continuación explicaremos brevemente el procedimiento que se siguió para realizar las medidas de inestabilidad de los diferentes sistemas llevados a cabo durante este PFC.

Primeramente con la ayuda del software de programación gráfica Labview se realizó un programa, un simulador de OSA virtual (se puede ver en el anexo A.3. del PFC). Éste se compone de un panel frontal en el que tendremos un indicador gráfico en el que visualizaremos el espectro óptico de nuestro sistema y dos controladores. En uno de ellos indicaremos el número de capturas de datos del OSA que queremos hacer y en el otro el intervalo (en segundos) de espera entre una y otra (en todas las pruebas se realizaron 60 capturas en intervalos de 10 segundos entre ellas, lo que equivale a 10 minutos de pruebas de inestabilidad \approx mid-term stability). Repitiéndose el proceso hasta en tres ocasiones sin realizar modificación alguna, para tener una mejor aproximación en el cálculo de los parámetros.

Posteriormente estos datos fueron tratados en Excel y MATLAB, donde se desarrollaron dos scripts diferentes (anexo A.2.).

En el primero recorreremos la tabla con los valores capturados, seleccionando sólo el valor máximo de cada emisión de línea. Para el cálculo del valor de la inestabilidad tomamos la diferencia (dB) entre el valor máximo y mínimo de todos los valores capturados. Posteriormente con el segundo script aplicamos un tratamiento estadístico a los datos previamente hallados y calculamos así los valores de las inestabilidades de potencia óptica de salida para distintos niveles de confianza (confidence level – C.L) 100, 99 y 90% típicamente.

Se midieron los valores correspondientes a los atenuadores de cada rama.

Canales	Longitud de onda aproximada λ
37	1548
41	1545
43	1543
47	1540

Tabla 4.1.3. Canales MUX-DMUX ITU

MUX Hi-Bi 3 metros	Atenuación (dB)
Canal 37	1,27
Canal 41	3,78
Canal 43	Máximo
Canal 47	1,12

Tabla 4.1.4. Valores de atenuación para el caso del MUX-DMUX

Couple Hi-Bi 3 metros	Atenuación (dB)
Canal 37	0,17
Canal 41	6,78
Canal 43	Máximo
Canal 47	3,58

Tabla 4.1.5. Valores de atenuación para el caso del Couple 4:2

La señal de excitación de los Add-Drop es la función de transferencia que proviene de la interferencia del ASE en la cavidad que se forma. Como se puede apreciar tenemos dos lóbulos (provenientes del interferómetro Sagnac) en el ancho de banda de cada dispositivo, de los cuales solo el predominante obtiene el estado de láser.

A continuación se muestran dos gráficas con la superposición de la función de transferencia del interferómetro y la de los Add-Drop (con y sin atenuación de los mismos).

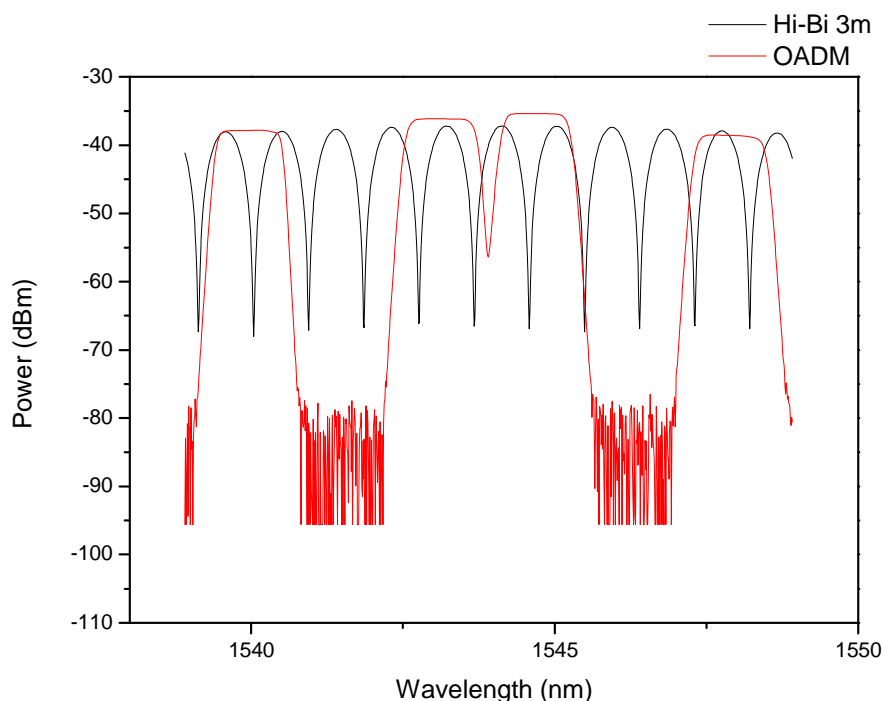


Figura 4.1.6. Interferómetro Hi-Bi de 3m y espectro Add-Drop sin atenuar

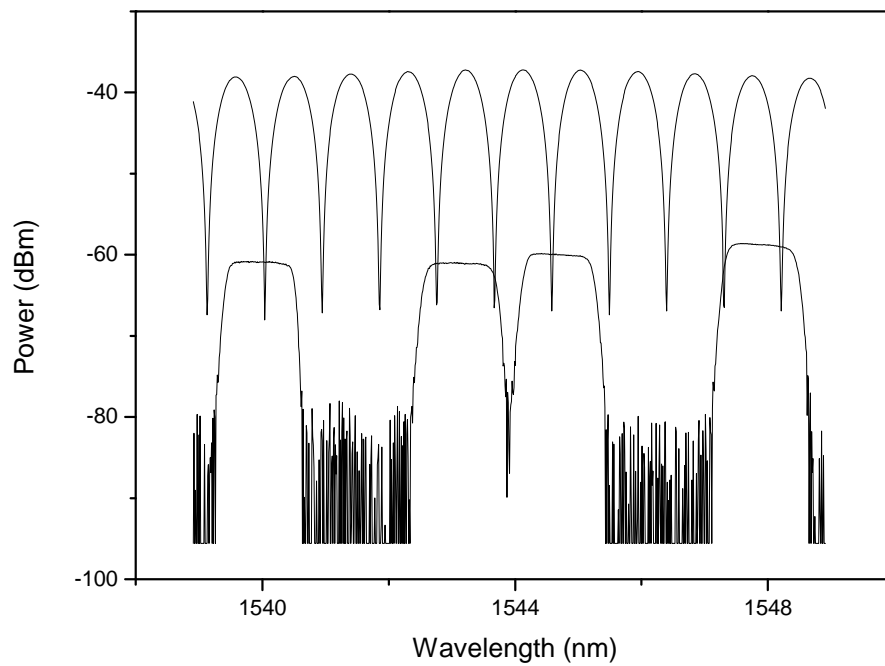


Figura 4.1.7. Interferómetro Hi-Bi de 3m y espectro Add-Drop atenuado

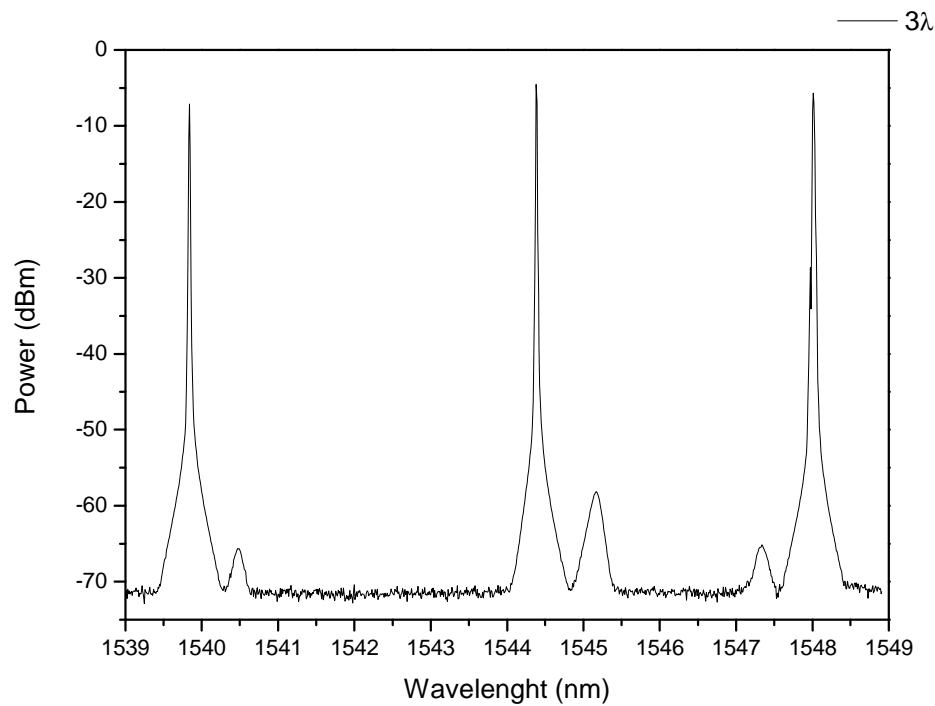


Figura 4.1.8. Espectro con sólo tres longitudes de onda con condición láser

El espectro sólo presenta tres longitudes de onda en emisión de línea, correspondiente al caso del estudio de la inestabilidad de la estructura. Correspondiendo para el caso en el que el canal 43 ha sido suprimido por completo por el atenuador variable.

Resultados con la fibra Hi-Bi de 1,5 metros:

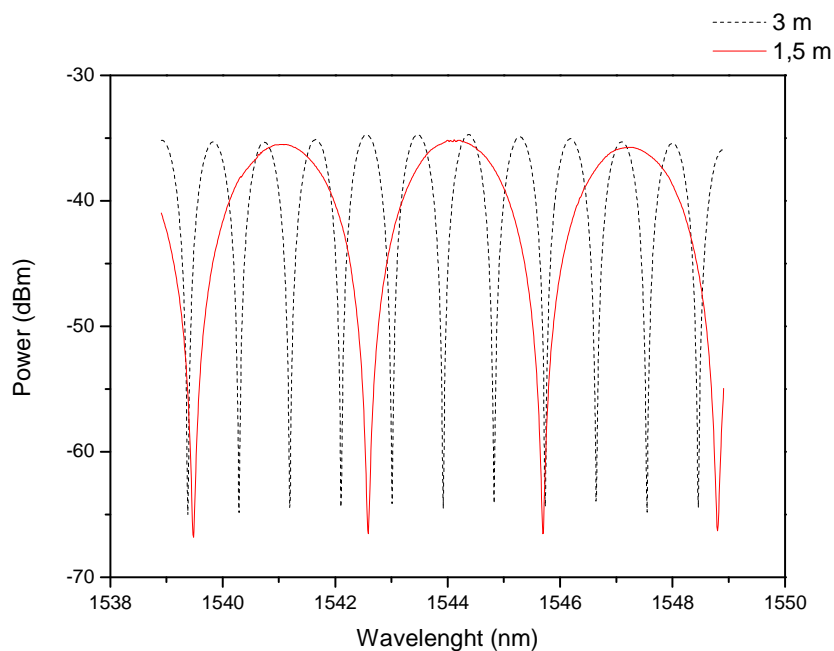


Figura 4.1.9. Gráfica de comparación de los espectros del interferómetro de 3 y 1,5 metros

En la figura 4.1.10. se muestra la comparación de los espectros entre el MUX y el acoplador con las cuatro longitudes de onda simultáneas, para el caso de la fibra Hi-Bi de 1,5 metros.

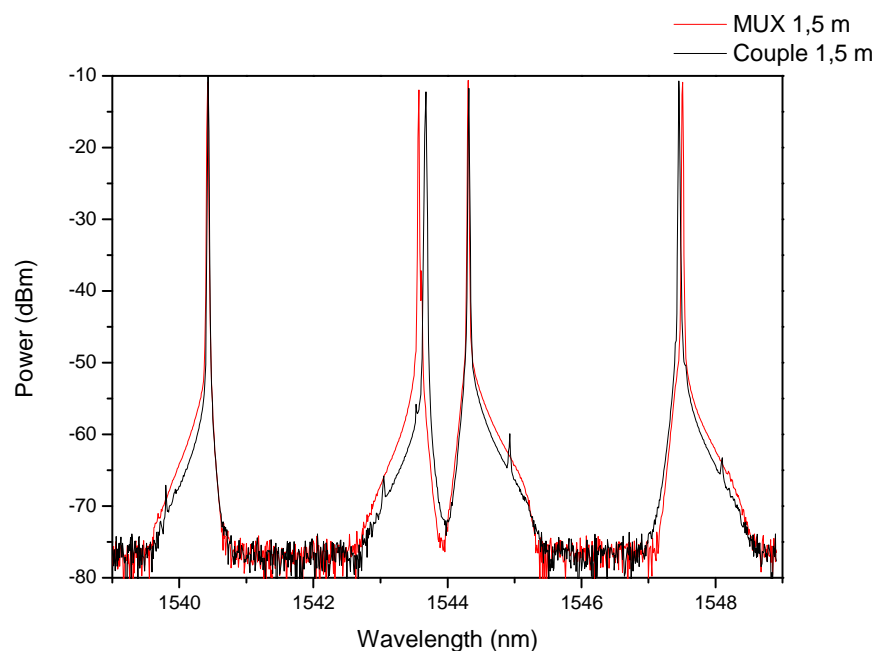


Figura 4.1.10. Comparación de espectros MUX y Couple, con fibra Hi-Bi 1,5 metros

En la siguiente figura vemos la comparativa para el caso de los 4 canales con el MUX, las fibras de Hi-Bi de 1,5 y de 3 metros respectivamente.

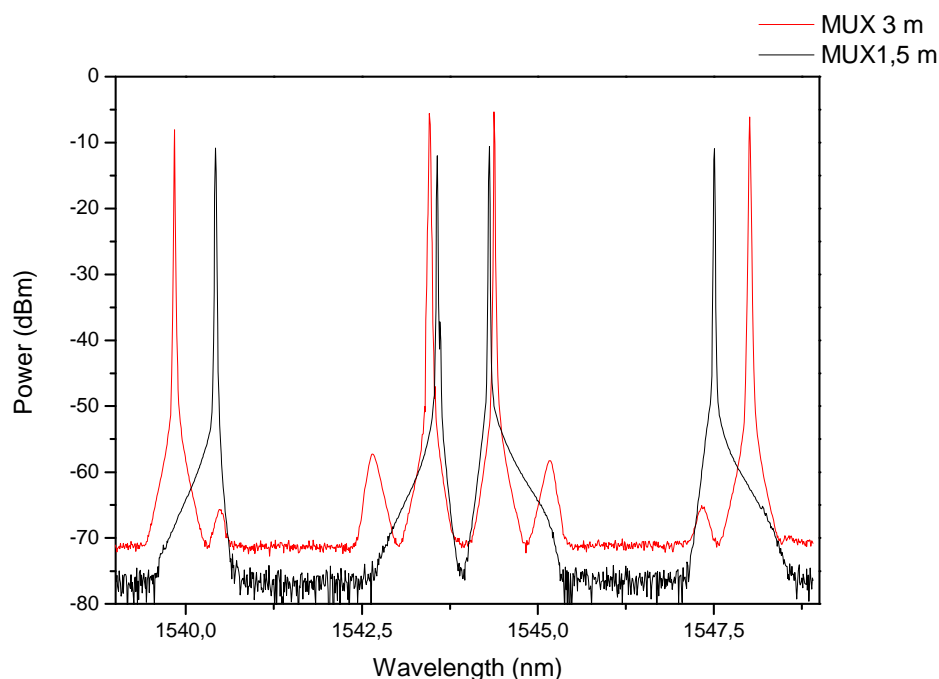


Figura 4.1.11. Comparación de espectros MUX con fibra Hi-Bi de 1,5 y 3 metros

Se puede apreciar en la captura del espectro óptico, que para el caso de 1,5 metros el ancho de banda (BW) es más estrecho y que la OSNR (Optical Signal Noise Ratio) es aproximadamente 5 dB más. Sin embargo como veremos a continuación en las tablas, la estabilidad empeora para dicho caso y además se ensancha la parte baja del propio espectro, desapareciendo los dos lóbulos que teníamos en el caso anterior, por consiguiente perdemos la capacidad de seleccionar la longitud de onda que tiene la condición láser dentro cada canal del Add-Drop.

Se realizaron las mismas medidas de inestabilidad pero ahora con la fibra altamente birrefringente Hi-Bi de 1,5 metros, obteniendo los valores de las siguientes tablas:

MUX 3 λ	Medida 1			Medida 2			Medida 3		
Estabilidad	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Amplitud 100% (dB)	4,744	3,885	4,372	4,103	6,763	9,347	3,251	4,125	4,032
Amplitud 99% (dB)	2,481	3,865	3,026	2,513	3,763	3,807	2,875	3,366	2,952
Amplitud 90% (dB)	1,925	2,992	2,475	1,815	2,598	2,74	1,832	2,961	2,114
Longitud de onda (nm)	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04

Tabla 4.1.6. Inestabilidad de tres lambdas con MUX-DMUX y fibra Hi-Bi 1,5 metros

COUPLE 4:2 3 λ	Medida 1			Medida 2			Medida 3		
Estabilidad	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Amplitud 100% (dB)	3,695	3,185	5,027	2,66	3,704	4,593	2,504	3,149	4,083
Amplitud 99% (dB)	3,478	3,126	3,746	2,527	3,168	3,689	2,174	3,001	3,715
Amplitud 90% (dB)	2,621	2,078	2,745	1,865	2,227	2,437	1,927	2,399	3,044
Longitud de onda (nm)	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04

Tabla 4.1.7. Inestabilidad de tres lambdas con Couple 4:2 y fibra Hi-Bi 1,5 metros

Valores de atenuación:

MUX Hi-Bi 1,5 metros	Atenuación (dB)	Couple Hi-Bi 1,5 metros	Atenuación (dB)
Canal 37	2,15	Canal 37	0,22
Canal 41	5,47	Canal 41	5,77
Canal 43	Máximo	Canal 43	Máximo
Canal 47	0,17	Canal 47	0,83

Tabla 4.1.8. Valores de atenuación para el caso del MUX-DMUX y Tabla 4.1.9. Valores de atenuación para el caso del Couple 4:2

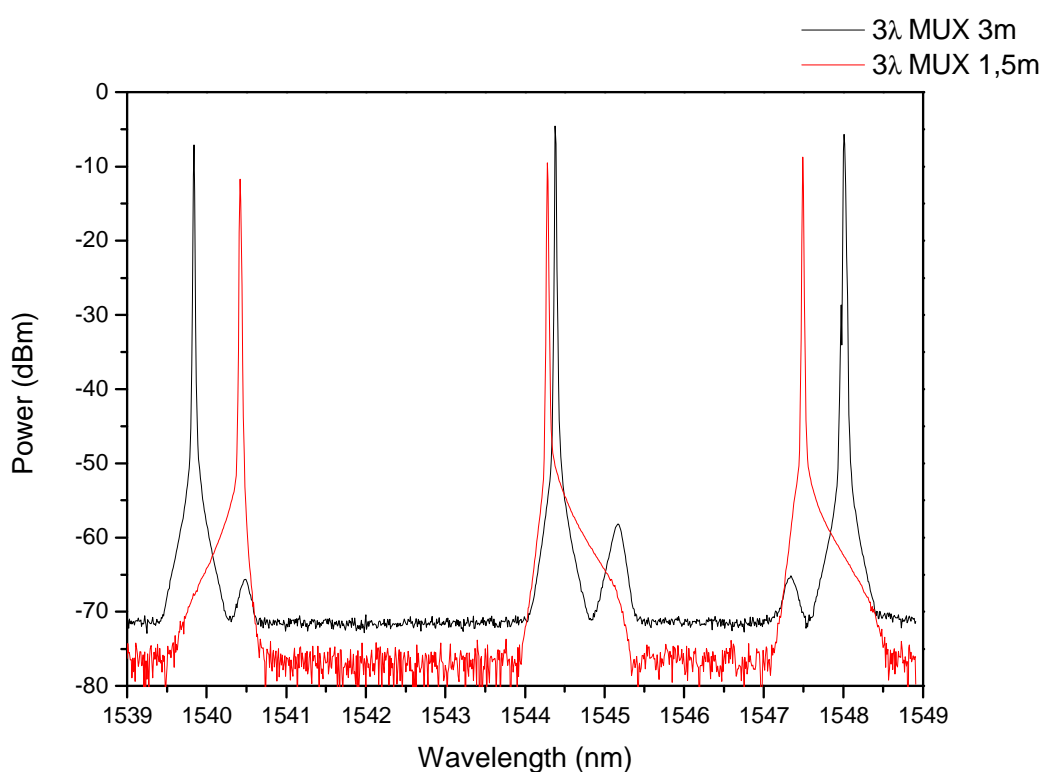


Figura 4.1.12. Comparación del espectro MUX con 3 lambdas para Hi-Bi de 1,5 y 3 metros

4.2 Láser multifrecuencia óptica usando un interferómetro Sagnac



Figura 4.2.1. Fotografía panorámica de la estructura

En este segundo proceso experimental se propone el diseño de un láser de fibra óptica con un PM-PFC interferómetro Sagnac y con una configuración de demultiplexor (DMUX) – multiplexor (MUX) interconectados entre sí, para la selección de las longitudes de onda. Esta estructura surge como una alternativa al caso expuesto anteriormente, remplazando los dispositivos OADM por DMUX-MUX aprovechando que estos últimos actúan como banco de filtros y que no introducen pérdidas al sistema. Logrando así un láser de cuatro longitudes de onda, con un OSNR de aproximadamente 60 dB y unos valores de inestabilidad inferiores a 1 dB.

El esquema consiste en una cavidad recirculante conectada a un interferómetro Sagnac y que usa como amplificador un equipo EDFA comercial de 21 dB de ganancia, como en el sistema anterior, aunque también se estudiaron posteriormente otros métodos alternativos de ganancia con el fin de suplir al primero.

Finalmente el láser generado se logró mediante un acoplador variable con una relación de acoplo 93:7. Con él, el 7% de la potencia óptica se volvió a recircular en el sistema y el 93% restante se llevó a la salida, donde se situó un analizador de espectros ópticos (OSA).

La selección de las longitudes de onda que obtienen la condición láser se consigue mediante un demultiplexor y multiplexor enfrentado el uno al otro y que actúan como un banco de filtros, como ya hemos explicado previamente. Las λ_1 , λ_2 , λ_3 y λ_4 utilizadas en este experimento, se corresponden con los canales 31, 35, 41 y 47 de la ITU que filtra el dispositivo óptico.

Además como se puede apreciar en la figura 4.2.2. en cada uno de los cuatro canales interconectados, introducimos un atenuador variable (VA) que nos permite regular independientemente la ganancia de cada uno, haciendo el sistema más eficiente y con más alternativas. De esta manera se puede conseguir una buena ecualización y así mejorar la estabilidad del sistema, como ocurría en el apartado 4.1.

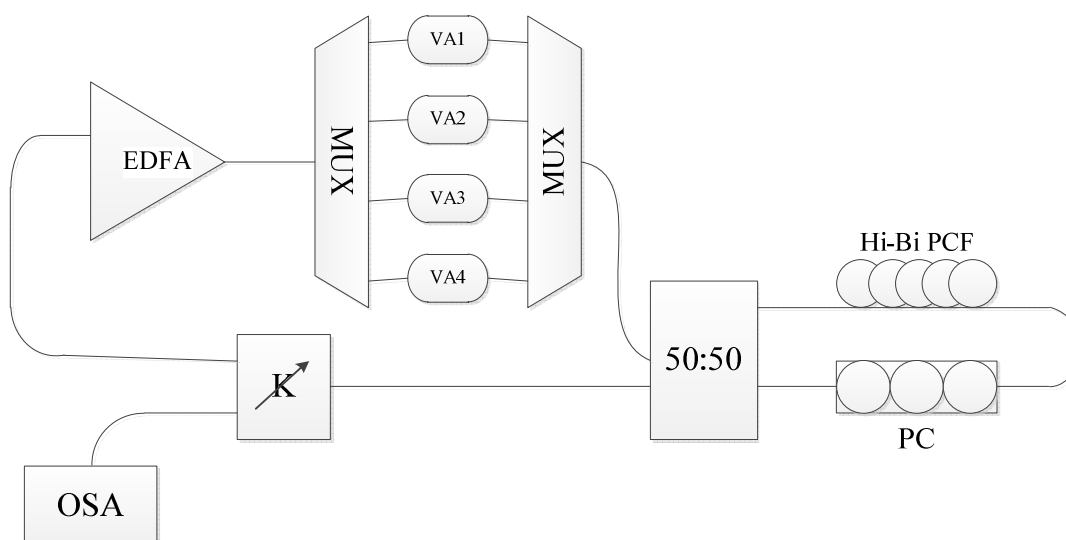


Figura 4.2.2. Esquema de la estructura

Optimizando la relación de acoplo del acoplador variable y el controlador de polarización, se obtuvieron los niveles de las longitudes de onda con emisión láser predominantes. Después de un correcto ajuste y ecualizado de los atenuadores variables, se obtuvo el espectro de salida en el OSA que se aprecia en la figura 4.2.3.

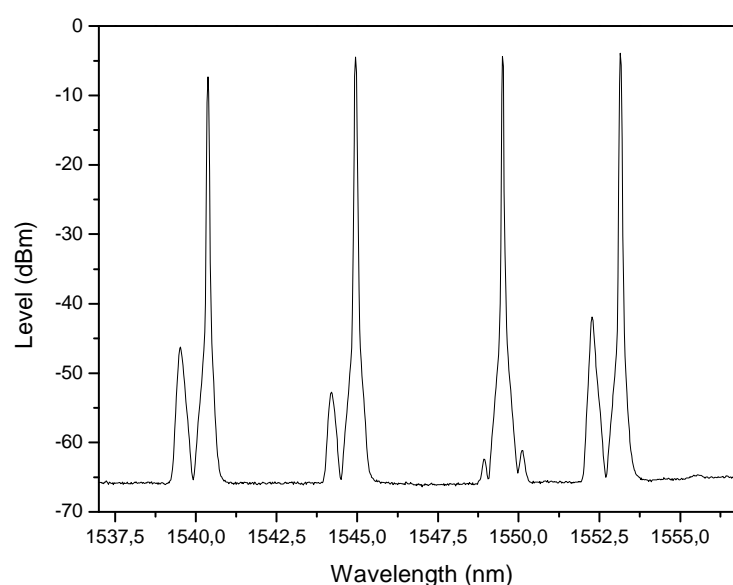


Figura 4.2.3. Espectro final del sistema

Canales	Longitud de onda λ (nm)	Longitud de onda aproximada λ (nm)
31	1552,52	1553
35	1549,53	1549,5
41	1544,93	1545
47	1539,77	1540,5

Tabla 4.2.1. Longitud de onda exacta y aproximada de los canales

MUX Hi-Bi 3 metros Atenuación (dB)	
Canal 31	0
Canal 35	2,75
Canal 41	3,15
Canal 47	4,15

Tabla 4.2.2. Valores de atenuación para los canales del MUX-DMUX

La captura se tomó en el OSA, con la siguiente configuración: modo Adaptativo, con una resolución de 0,01 nm y un span de 20 nm.

Atenuando por completo uno de los canales (canal 41 de la ITU, 1545 nm) del sistema, vemos que los niveles de señal óptica de salida para los tres láseres restantes aumentan con respecto al caso de las cuatro emisiones láser simultáneas.

También se observa una mejora para el caso de la inestabilidad del sistema, ya que las tres longitudes de onda restantes tendrán una menor competencia de ganancia entre ellas.

Siendo ésto clave en la inestabilidad de la estructura, será conveniente atenuar al máximo alguna de las dos longitudes de onda con condición láser del centro del espectro y no de los extremos, ya que al estar más próximas en longitud de onda el problema de la competencia de ganancia será peor.

Cuanto más próximas estén las emisiones láser el problema de competencia de ganancia será más evidente, debido a que la amplificación óptica no se produce literalmente en niveles de energía exactos, sino más bien en un conjunto de niveles desdoblado y de diferente energía de los mismos que podremos denominar bandas de energía.

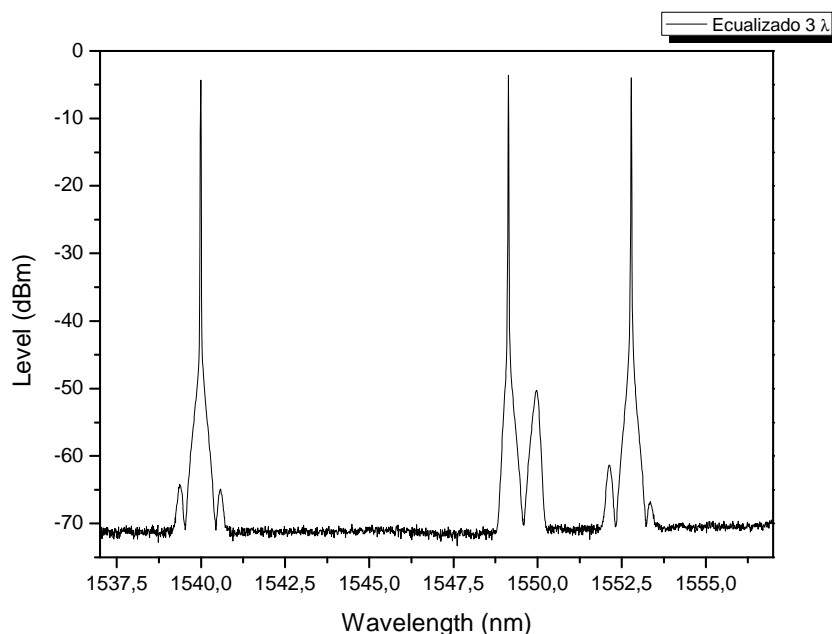


Figura 4.2.4. Espectro con sólo tres longitudes de onda con condición láser

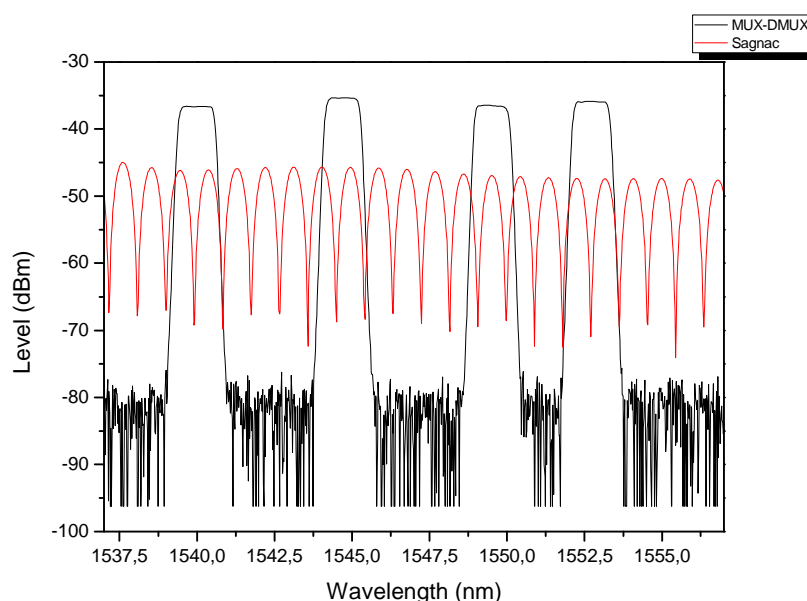


Figura 4.2.5. Función del Sagnac (rojo) y del DMUX-MUX (negro)

Al someter a estudio las dos fibras altamente birrefringentes, se decidió soldar también una nueva fibra de longitud intermedia a los dos casos que ya teníamos (2,25 metros) para así poder caracterizar mejor los efectos y características de las mismas en la estructura en desarrollo.

Como alternativas para obtener ganancia, además del equipo EDFA comercial se probó con una fibra fuertemente dopada con erbio (Liekki Er-30) de dos longitudes: una de 5 y otra de 7 metros respectivamente, y también con fibra de cristal fotónico dopada con erbio (Photonic crystal fiber - PCF). El bombeo se realizó con una fuente láser de 980nm a través de un WDM 980/1550 nm, por el que se suministraron 200 mW de potencia (figura 4.2.6).

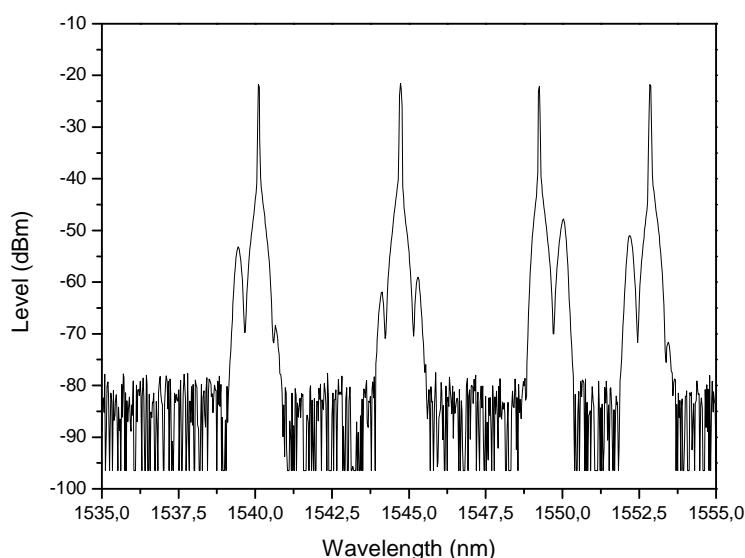


Figura 4.2.6. Láser de bombeo ILX Lightwave LDM-4980

Estas alternativas se probaron con objeto de mejorar las prestaciones del equipo EDFA comercial, en especial, buscando la reducción de modos longitudinales del láser, reducción de ruido y estabilidad en potencia.

Durante las pruebas realizadas apreciamos que aparecía una elevada cantidad de ASE. Ésto es debido al método de amplificación utilizado. Ahora se genera el ASE de forma bidireccional y este recircula por todo el sistema, adquiriendo un nivel alto. Resolvemos este inconveniente colocando un aislador como se puede apreciar en la figura 4.2.7. (b), que evita que parte del ASE recircule en uno de los dos sentidos posibles dentro de la estructura. Consiguiendo de este modo una clara mejoría en cuanto al nivel de señal óptica (con aislador).

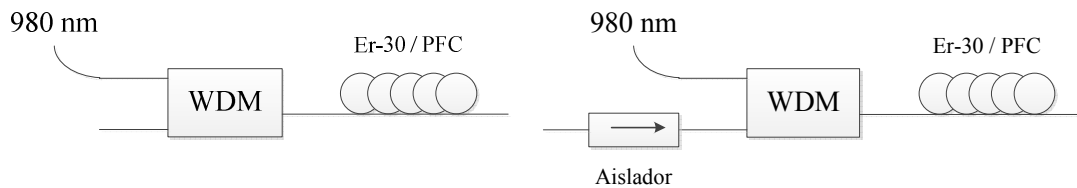


Figura 4.2.7. (a) Bombeo sin aislador

(b) Bombeo con aislador

También nos dimos cuenta que dependiendo de la fuente láser de bombeo que utilizásemos el resultado variaba. Los dos casos analizados fueron: Amonics (250mW) y láser ILX Lightwave LDM-4980 (180mW). El segundo caso se comporta mejor, ya que en los dos casos tenemos niveles de señales semejantes (en torno a -20 dBm), pero empleando menos potencia de bombeo para en el caso del láser LDM-4980.

En la figura 4.2.8. se ve un comparativa de ambos casos analizados:

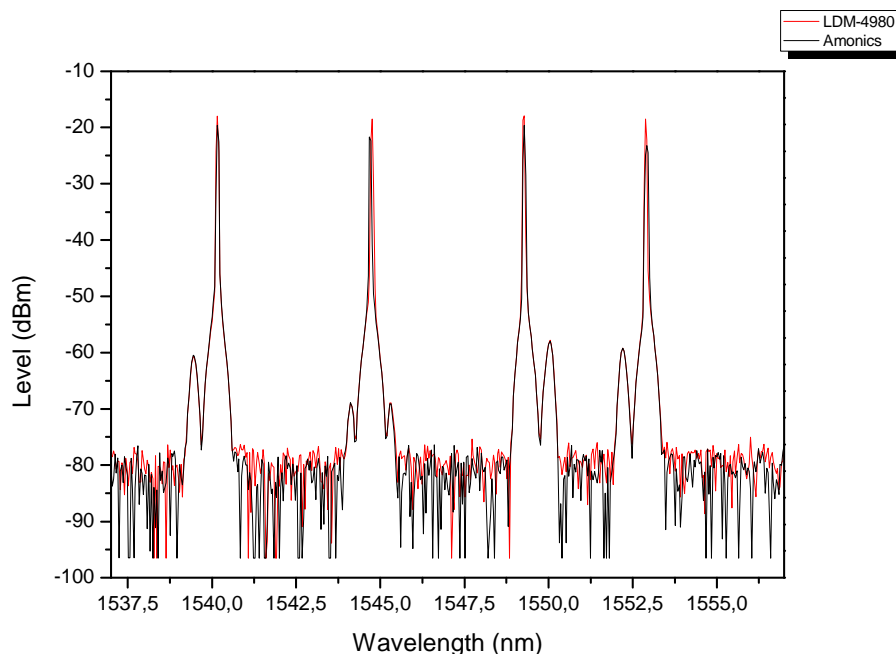


Figura 4.2.8. Comparativa entre los diferentes láseres de bombeo

En el caso de la fibra PCF dopada con Erblio no se consiguió obtener emisión láser, dado que no se conseguía absorber la potencia óptica de bombeo que inyectábamos.

Posteriormente se cambió la fibra de cristal fotónico, por fibra fuertemente dopada Er-30 de Liekki (se hicieron pruebas con dos longitudes distintas).

Inicialmente se emplearon 5 metros de fibra fuertemente dopada Er-30, con la que se obtuvieron unos niveles de -20 dBm de potencia óptica de salida para cada longitud de onda de emisión láser y una OSNR de aproximadamente 60 dB.

Este resultado se consideró aceptable y está representado en la figura 4.2.8, con la correspondiente comparativa entre los diferentes bombeos ópticos.

Se realizó una segunda prueba con una longitud de 7 metros, pero no se consiguieron niveles adecuados de señal óptica a la salida del láser. Esto fue debido a que dicha longitud absorbe más potencia óptica de la que consigue amplificar, a diferencia de lo que sucedía en el primer caso. Además, debido a la alta competencia de ganancia, el sistema era altamente inestable.

Debido a este hecho, resultó casi imposible obtener una buena ecualización de las potencias, y no se consiguió la emisión láser simultánea de las cuatro longitudes de onda.

En la siguiente tabla tenemos las inestabilidades para el caso de un nivel de confianza del 100% (CL) de nuestra estructura con la fibra fuertemente dopada con Erblio Er-30 de 5 metros de longitud y los dos diferentes casos de bombeo óptico empleados.

Bombeo óptico	ILX Lightwave LDM-4980	Amonics
λ_1	3,123	1,694
λ_2	2,586	2,936
λ_3	5,575	3,524
λ_4	5,500	3,682

Tabla 4.1.12. Estabilidad Amplitud

Se realizó un estudio comparativo de diferentes longitudes de la fibra Hi-Bi 1,5 y 3 metros, en el que se analizaron los niveles de señal alcanzados, así como la estabilidad para las distintas fibras y el comportamiento de los lóbulos secundarios de las emisiones láser producidas por la estructura. De los datos obtenidos deducimos que los mejores resultados son para el caso de la fibra Hi-Bi PM de 3 metros.

A continuación se pueden ver cuatro gráficos en los que se hace una comparativa de diferentes métodos de ganancia (EDFA y Er-30 de 5 metros) y distintas longitudes de fibra altamente birrefringente (de 1,5 y 3 metros respectivamente).

De los que deduciremos qué método de ganancia es el que produce mejores resultados y cuál es la longitud que más nos interesa para nuestro sistema, debido a sus propiedades.

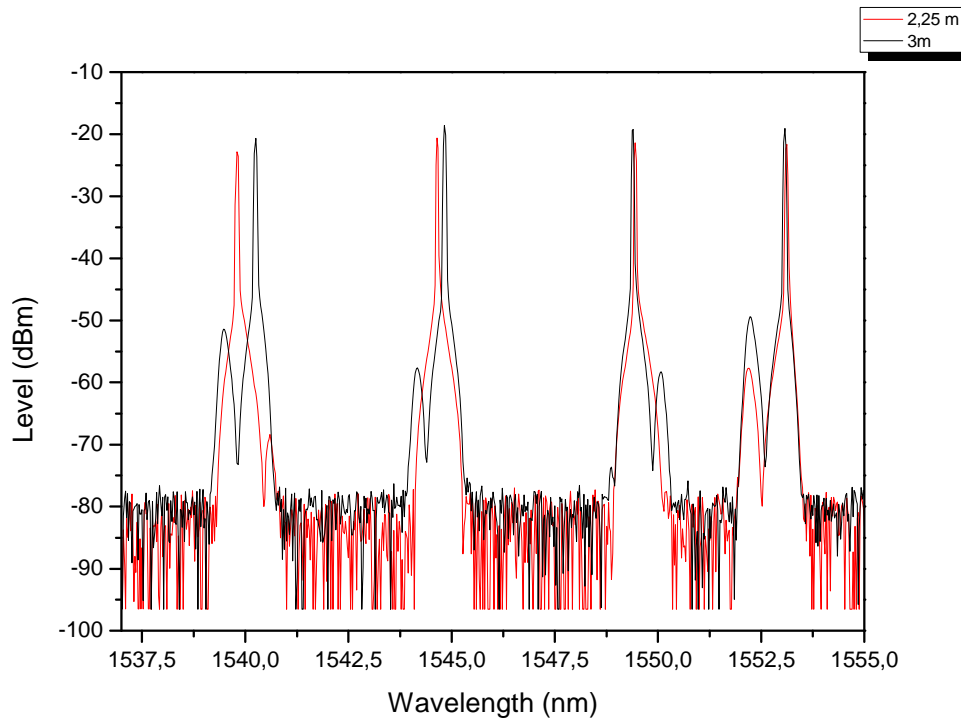


Figura 4.2.9. Gráfico comparando amplificación Er-30 de 5m y Hi-Bi de 2,25 y 3 metros

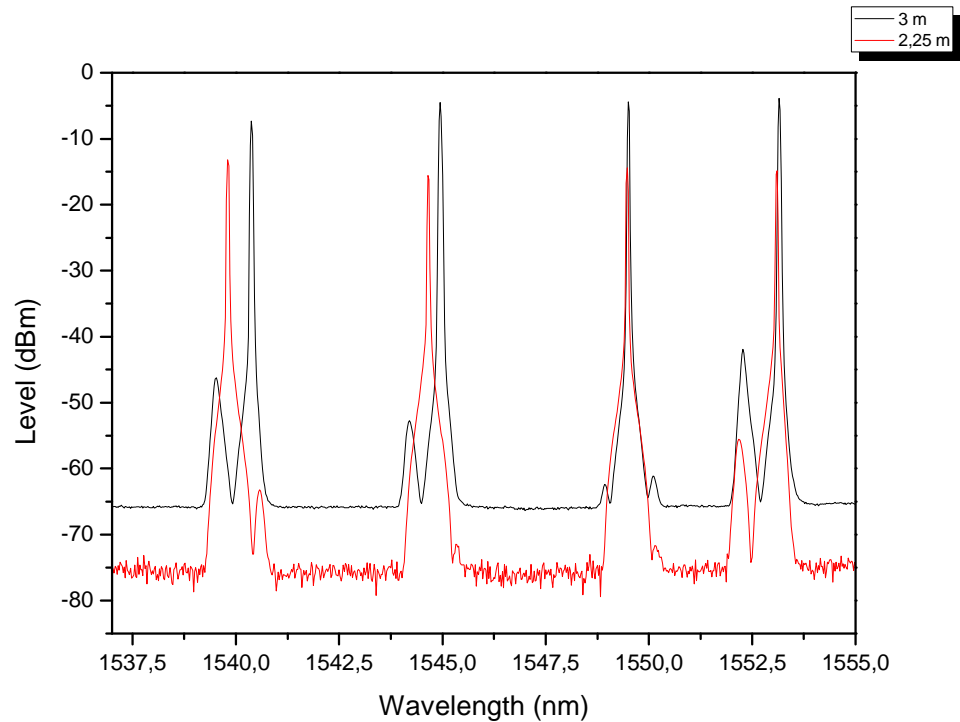


Figura 4.2.10. Gráfico comparando amplificación EDFA y Hi-Bi de 2,25 y 3 metros

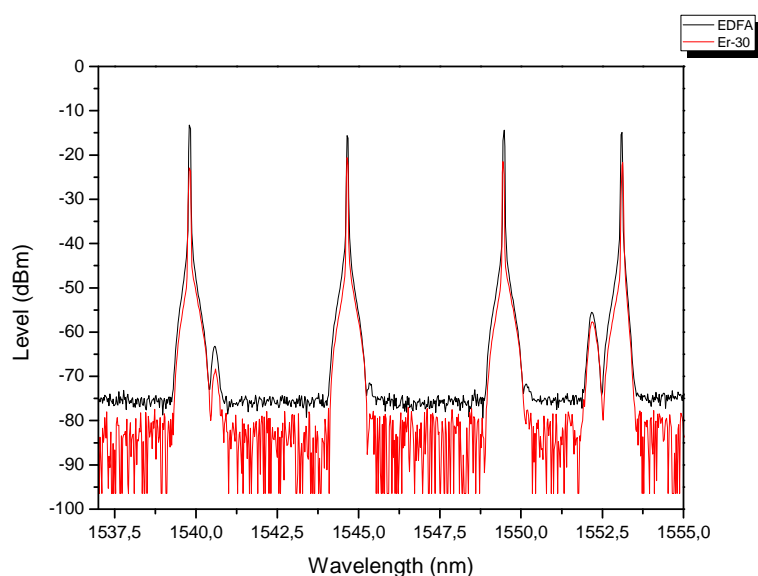


Figura 4.2.11. Gráfico comparando el sistema para EDFA comercial y Er-30 de 5 metros, con Hi-Bi de 2,25 metros

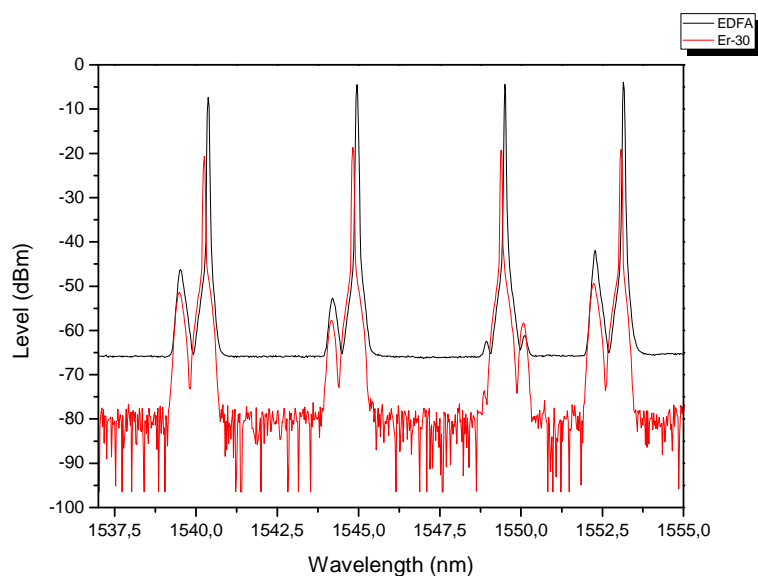


Figura 4.2.12. Gráfico comparando el sistema habitual para EDFA y Er-30 de 5 metros, con Hi-Bi de 3 metros

Se procedió a un estudio de las inestabilidades:

Wavelength	Estabilidad de la amplitud del láser			
	I.C 100%	I.C 99%	I.C 90%	I.C 75%
λ_1	4,761	4,521	2,794	2,221
λ_2	2.176	2,000	1,216	0,977
λ_3	5.739	3,554	3,055	2,472
λ_4	3.858	3,476	2,524	1,874

Tabla 4.2.4. Inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 3 metros

Código de colores para las longitudes de onda: λ_1 -negra, λ_2 -roja, λ_3 -azul y λ_4 -verde.

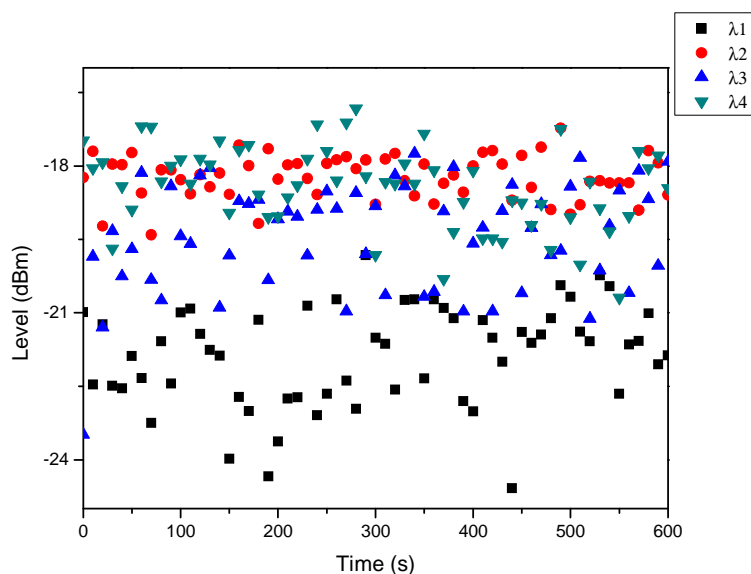


Figura 4.2.13. Valores inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 3 metros

Wavelength	Estabilidad de la amplitud del láser			
	I.C 100%	I.C 99%	I.C 90%	I.C 75%
λ_1	3,645	3,410	2,399	1,659
λ_2	3,353	2,667	1,629	1,225
λ_3	4,353	3,281	2,577	1,923
λ_4	2,254	2,535	1,755	1,254

Tabla 4.2.5. Inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 2,25 metros

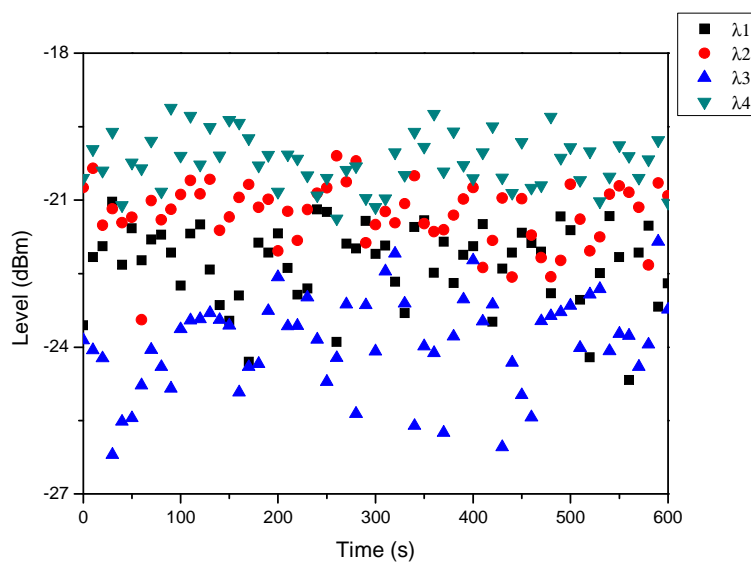


Figura 4.2.14. Valores inestabilidad Er-30 5 metros y Hi-Bi 2,25 metros

Wavelength	Estabilidad de la amplitud del láser			
	I.C 100%	I.C 99%	I.C 90%	I.C 75%
λ_1	1,617	1,522	0,970	0,794
λ_2	1,546	1,387	0,952	0,599
λ_3	1,452	1,442	0,939	0,714
λ_4	1,075	1,066	0,822	0,527

Tabla 4.2.6. Inestabilidad EDFA y Hi-Bi 3 metros

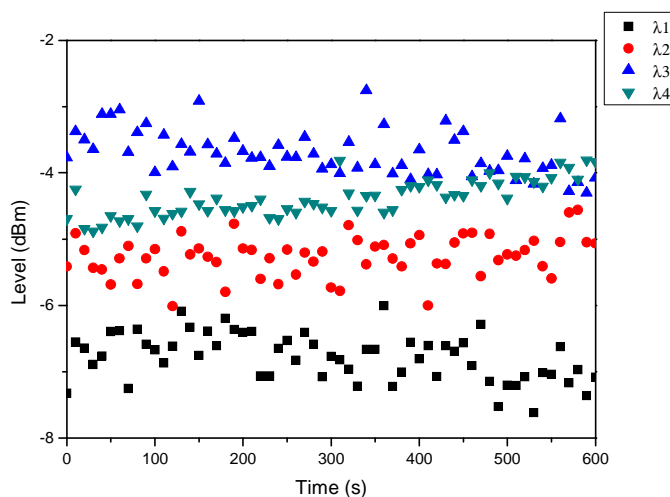


Figura 4.2.15. Valores inestabilidad EDFA y Hi-Bi 3 metros

Wavelength	Estabilidad de la amplitud del láser			
	I.C 100%	I.C 99%	I.C 90%	I.C 75%
λ_1	1,376	0,997	0,729	0,553
λ_2	1,235	1,172	0,911	0,712
λ_3	1,142	1,085	0,860	0,550
λ_4	1,607	1,261	0,944	0,612

Tabla 4.2.7. Inestabilidad EDFA y Hi-Bi 2,25 metros

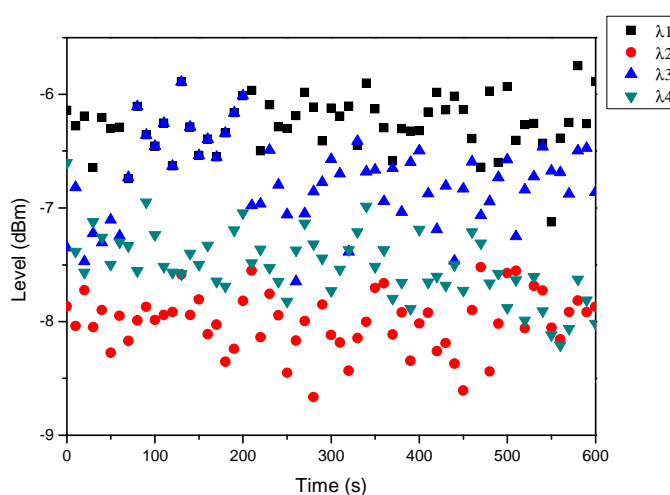


Figura 4.2.16. Valores inestabilidad EDFA y Hi-Bi 2,25 metros

Introducimos un filtro sintonizable en el sistema, dentro de los diferentes canales del WDM. Se probó colocando dicho filtro en las ramas de los cuatro canales, entre el atenuador variable y el DMUX-MUX, como se aprecia figura 4.2.17.

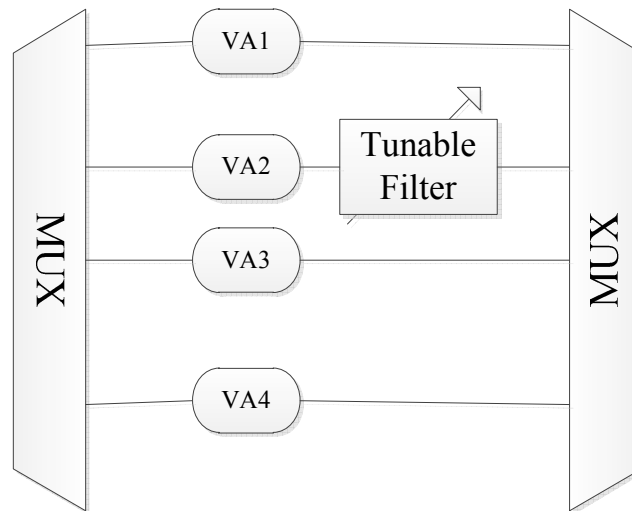


Figura 4.2.17. Esquema con filtro sintonizable

Realizamos pruebas con las dos fibras altamente birrefringentes para comprobar si con ambas podíamos conseguir láseres sintonizables con el filtro. Durante las mismas nos dimos cuenta de que con la fibra Hi-Bi de 2,25 metros los lóbulos laterales de los cuatro láseres no alcanzaban suficiente nivel de señal óptica, como para poder tener la posibilidad de excitar uno u otro a voluntad dentro de cada canal. Así que hicimos las medidas para el caso de la fibra Hi-Bi de 3 metros, como se observa en la figura 4.2.18.

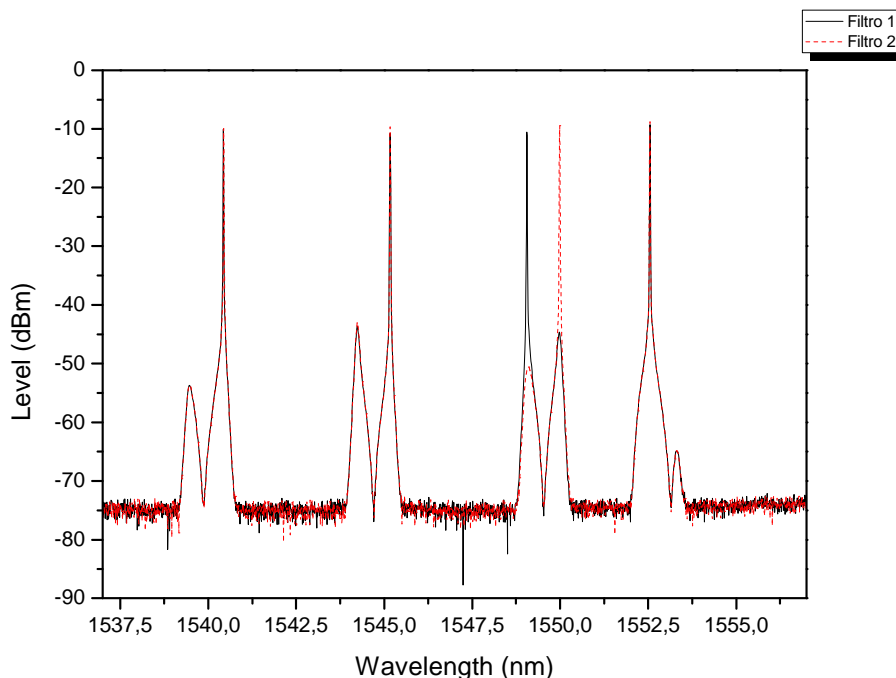


Figura 4.2.18. Espectro con filtro sintonizable, EDFA y Hi-Bi de 3 de metros

Se ha observado que el mejor comportamiento del sistema se daba con el acoplador variable con una relación de acoplo 93:7, como hemos explicado antes. A la hora sustituir dicho acoplador variable por uno comercial, se han escogido las relaciones de acoplo 90:10 y 70:30 como caso de estudio. Figuras de los acopladores:

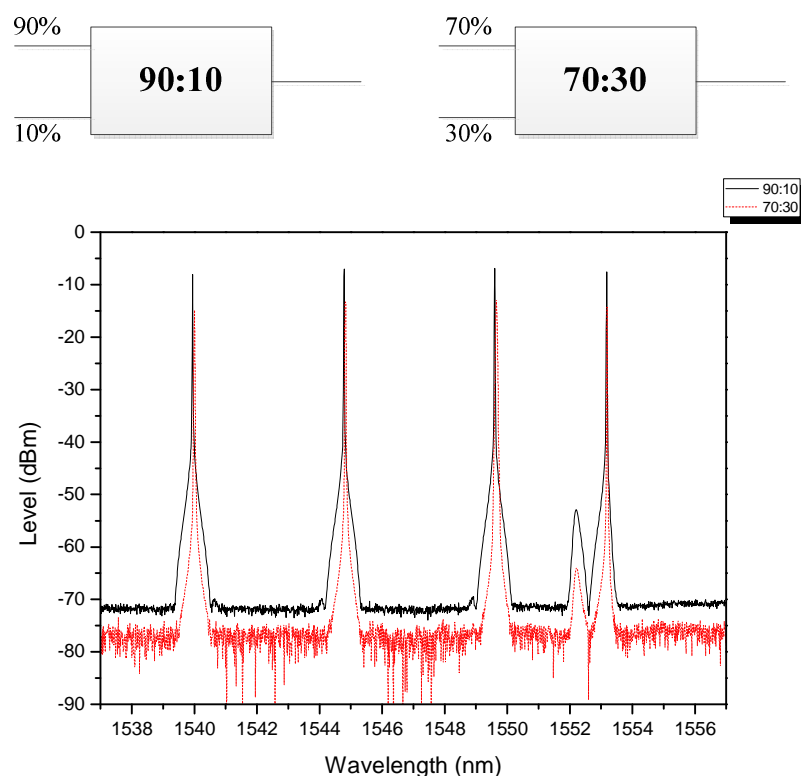


Figura 4.2.20. Comparación 90:10 y 70:30 con la fibra Hi-Bi de 2,25 metros

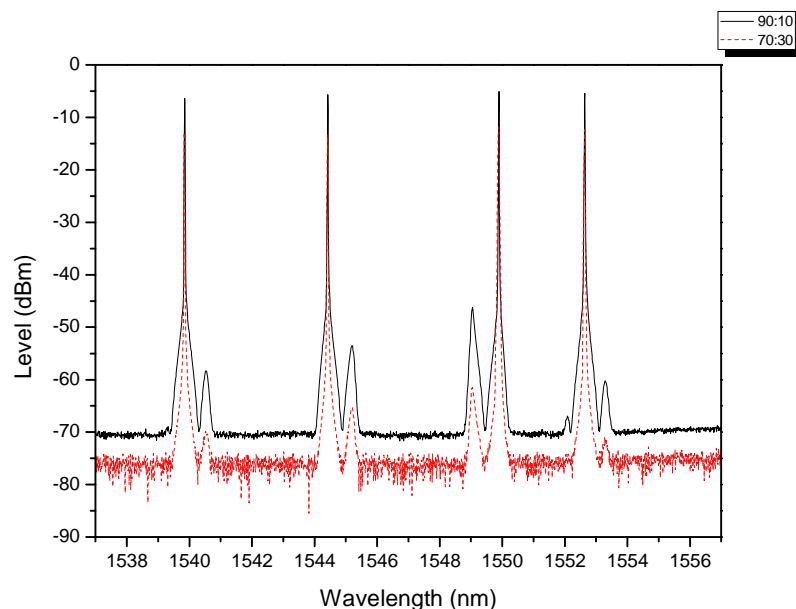


Figura 4.2.21. Comparación 90:10 y 70:30 con la fibra Hi-Bi de 3 metros

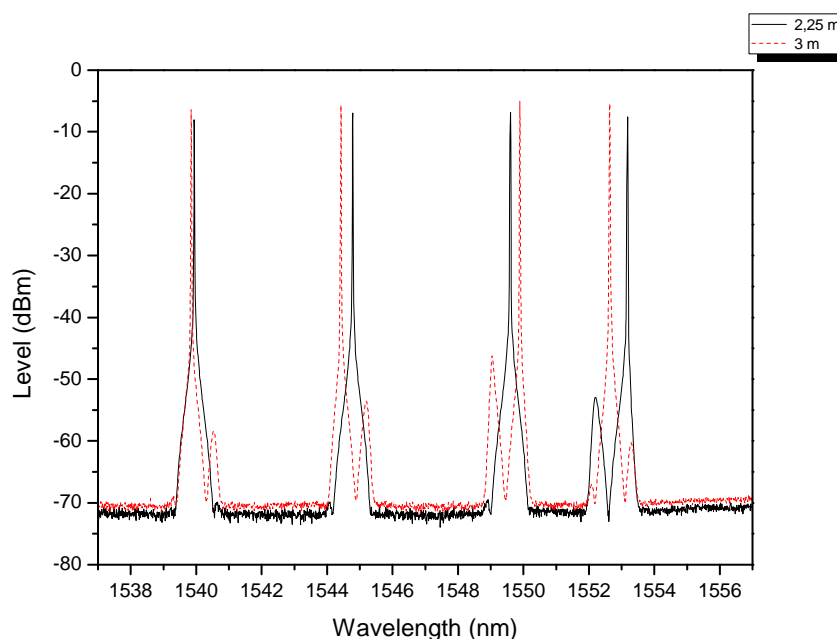


Figura 4.2.22. Comparación 90:10 con la fibra Hi-Bi de 2,25 y 3 metros

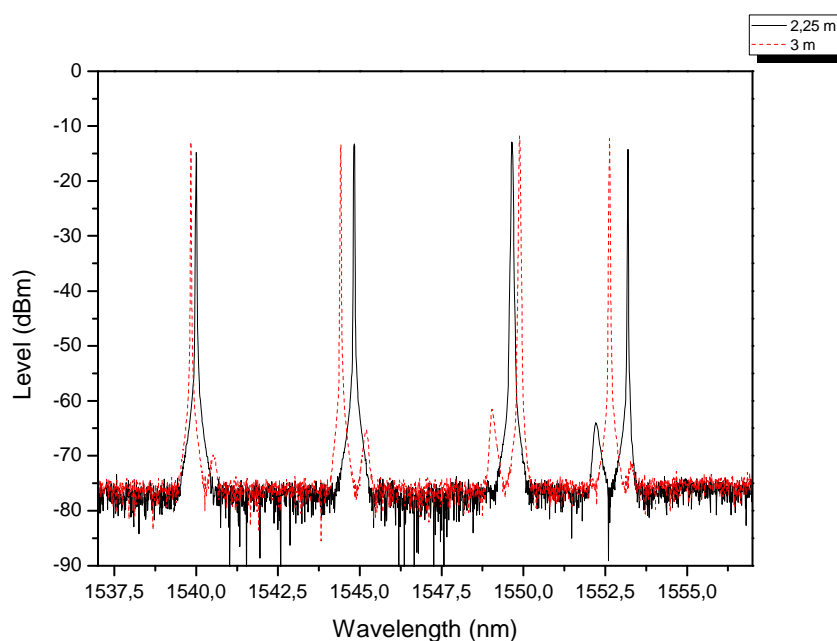


Figura 4.2.23. Comparación 70:30 con la fibra Hi-Bi de 2,25 y 3 metros

Como conclusión se debe reseñar que la OSNR es prácticamente idéntica para los diferentes casos analizados.

Para el caso de la fibra altamente birrefringente de 3 metros los lóbulos principales son más estrechos y los lóbulos secundarios poseen más nivel de potencia, que para el caso de 2,25 metros. Deducimos que ésto puede ser mejor en el caso que se desee conseguir que haya dos láseres, uno con cada lóbulo, dentro de cada una de las bandas ITU del WDM.

Posteriormente la rama del 90% del acoplador 90:10 que iba al OSA, la conectamos a un nuevo acoplador 50:50 para analizar a la vez el espectro en OSA y en el BOSA. Escogemos las longitudes de onda de los extremos y ecualizamos el sistema, atenuando las dos longitudes de onda que tienen la condición de láser hasta que observamos en el BOSA que se comportan como monomodo. Ésto se da para un valor de las señales ópticas de -26 dBm (EDFA a 15 dB), las siguientes capturas están tomadas con el BOSA con un span de 0,4 nm y una resolución de 0,08 pm (0,01 GHz).

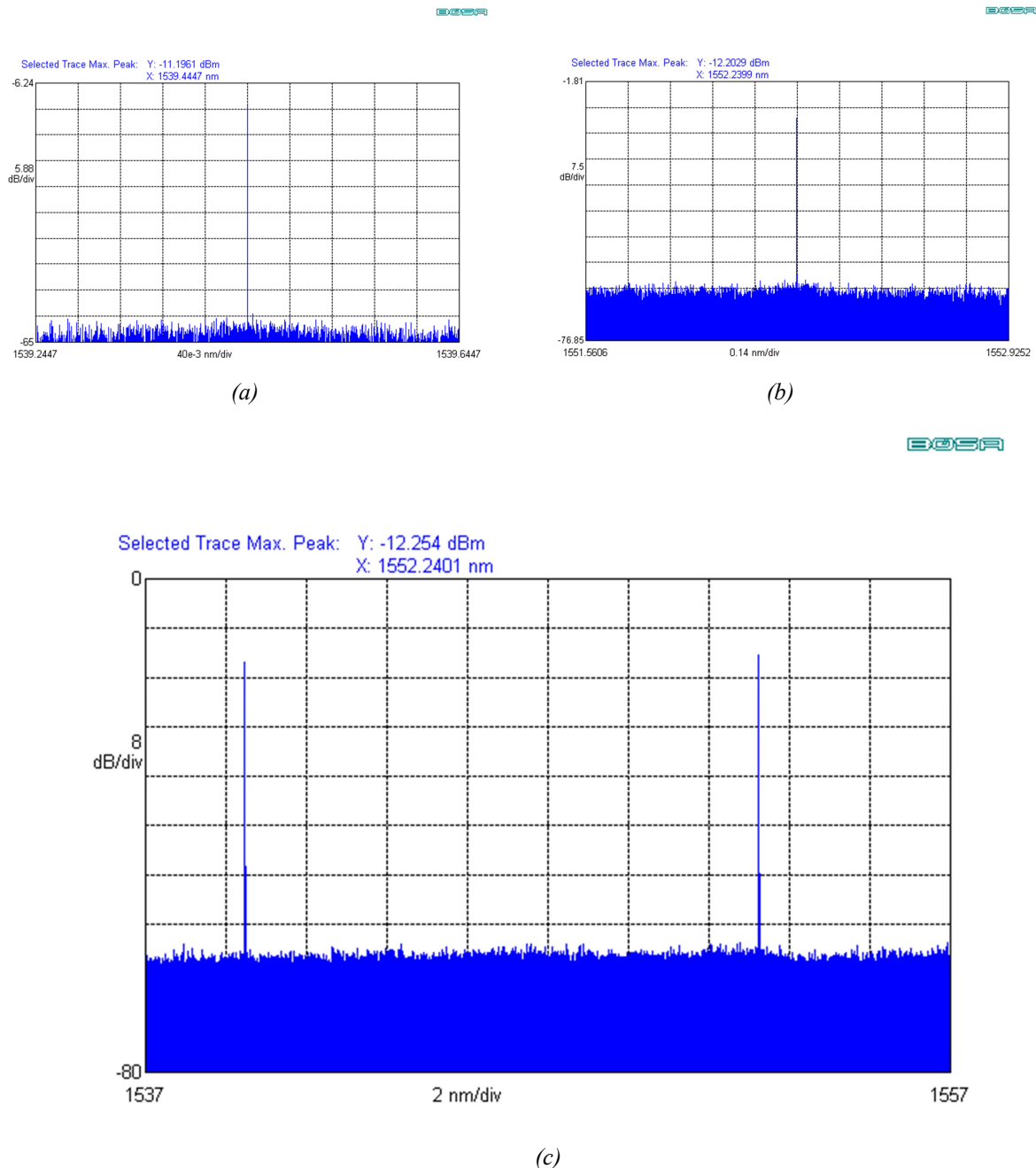


Figura 4.2.24. (a) Longitud de onda con emisión de línea monomodo del extremo izquierdo (b) del extremo derecho y (c) Ambas

4.3 Láser estructura FOX-SMITH / MICHELSON

En el apartado 3.2 de esta memoria se comentó brevemente ambas estructuras. La estructura de fibra óptica de un resonador Fox-Smith se compone de un acoplador (2x2) con una de sus ramas conectada al OSA y al bombeo externo mediante un WDM y con las otras tres restantes soldadas a diferentes tipos de fibras espejadas en su final, como se puede apreciar en la siguiente figura.

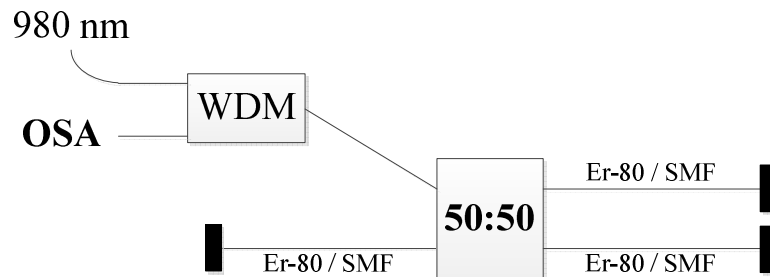


Figura 4.3.1. Esquema estructura Fox-Smith

En esta estructura se crea más de una cavidad óptica resonante, con lo que lograremos obtener supresión modal e intentaremos conseguir que sólo un número reducido de longitudes de onda alcancen la condición de láser y que además lo hagan de forma monomodo.

El sistema que sometemos a análisis se compone de dos fibras fuertemente dopadas Er-80 de Liekki y una SMF, todas de la misma longitud aproximadamente (9 cm). Probamos con dos láseres de bombeo ópticos diferentes a 980 nm: a) Amonics (200 mA) y b) Láser de bombeo “ILX Lightwave LDM-4980 Series Laser Diode mount” (400 mA). En dichas pruebas no conseguimos que se absorbiera potencia de bombeo suficiente, por lo que no teníamos ganancia.

A fin de solventar este problema de ganancia introducimos un EDFA comercial en la estructura, para obtener ganancia y conseguir así que alguna longitud de onda alcanzase la condición de láser. Sustituimos la fibra SMF por un circulador con el EDFA de 21 dB, como se ve en la siguiente figura. Se considera que ésta nueva estructura óptica es más cercana a un interferómetro Michelson que a un resonador Fox-Smith.

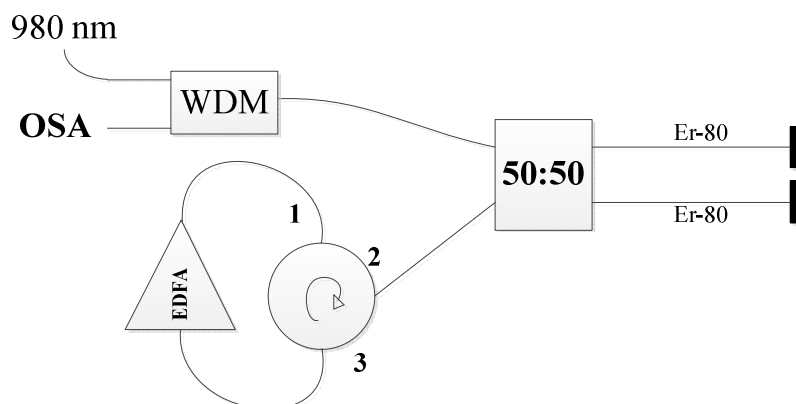


Figura 4.3.2. Esquema de la estructura Michelson

Realizamos pruebas del sistema con y sin bombeo externo para tres combinaciones diferentes de las dos fibras: una Er-80 y otra SMF, ambas de Er-80 y ambas SMF. Las siguientes capturas son para el caso de ambas fibras de Er-80 Liekki.

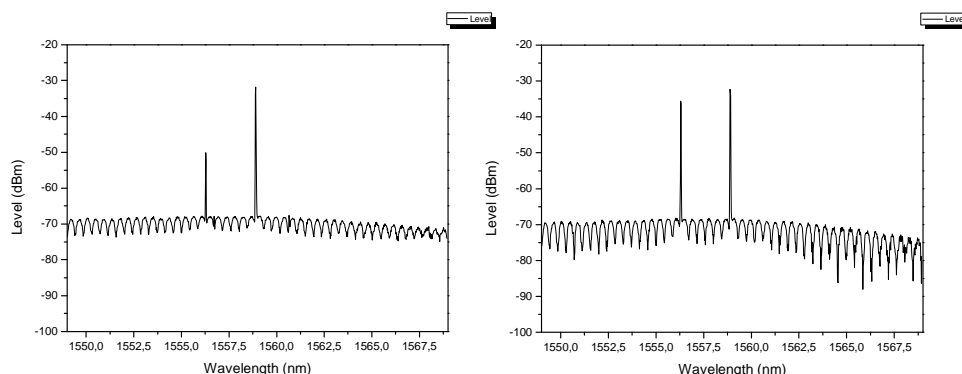


Figura 4.3.3. a) Con bombeo y b) Sin bombeo

De los diferentes test realizados concluimos que el bombeo no afecta al nivel de señal óptica que obtenemos con esta estructura. Aunque con el bombeo exterior conseguimos reforzar el bombeo interno del propio EDFA, por lo que tenemos una leve mejora.

En las figuras de la parte superior comprobamos que las fibras fuertemente dopadas con Erblio (Er-80) están actuando como absorbente saturable, haciendo el sistema más estable y reduciendo el número de longitudes de onda con condición láser dentro del mismo. Así concluimos que el mejor caso de estudio para posteriores pruebas, es el de la estructura Michelson con ambas fibras de Er-80. Asimismo nos fijamos en que el espectro tiene una forma similar a la de un interferómetro, con un leve rizado. Se considerará dicha estructura apta para el desarrollo de nuevos sistemas sensores-láser.

Se intentó buscar el aumento de la estabilidad del sistema cambiando el acoplador 50:50 por un 90:10, realimentando el 10% de la señal óptica y extrayendo el 90% de la misma al OSA. Al tener ahora menos potencia recirculando por la estructura en principio debería mejorar la estabilidad, ya que habría menos modos con la condición de láser y por consiguiente habría menos competencia entre ellos, pero observamos que los resultados con el 50:50 son mejores.

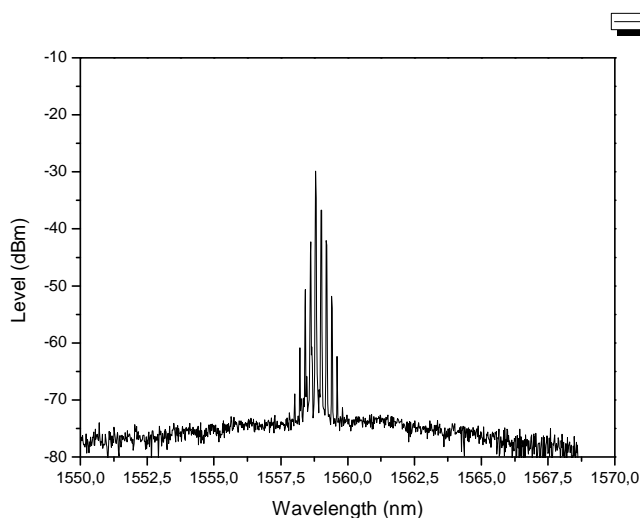


Figura 4.3.4. Espectro con el acoplador 90:10

Las especificaciones del OSA para las capturas han sido: RBW 0,02 nm, SPAN 20 nm y modo Adaptativo.

En pos de hallar el factor de acoplo ideal para la estructura, reemplazamos el acoplador 50:50 por uno variable y realizamos un barrido para diferentes factores de acoplo. Observando que el mejor caso por temas de OSNR se daba en el que realimentamos el 45% de la señal y llevamos el 55% al OSA, por lo que concluimos que el acoplador comercial más óptimo de los que disponemos para el sistema es el 50:50 del caso original.

Probamos una nueva variante de la estructura, en la que tenemos tres tramos de igual longitud (9 cm) de fibra de Er-80 y luego mediante un acoplador variable introducimos bombeo a 980 nm y un anillo de ganancia con circulador óptico y un EDFA.

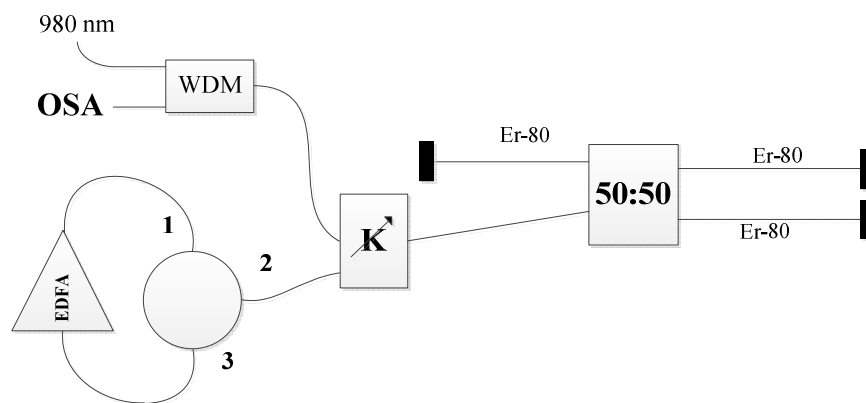


Figura 4.3.5. Estructura con tres tramos de Er-80 y bombeo más EDFA

Tras evaluar la potencia de salida, observamos que es más inestable que para los casos previos de estudio, pero advertimos que dependiendo del factor de acoplo del acoplador variable, conseguimos que diferentes longitudes alcancen la condición de láser en una zona u otra del espectro o incluso en ambas, o en el primer o en el segundo lóbulo de espectro de ganancia característico de un EDFA, como se puede ver en la siguiente captura.

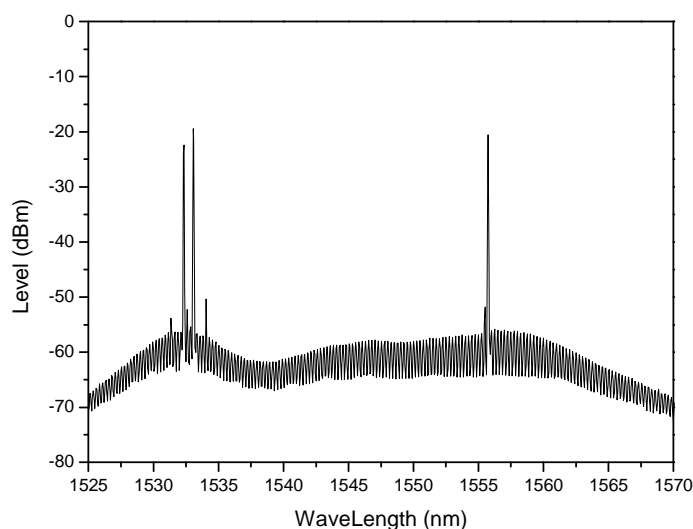


Figura 4.3.6. Espectro de la estructura con el acoplador variable

Ahora cambiamos la relación entre las longitudes de las fibras de un factor L-L a uno L-3L, con $L \approx 9$ cm. Observamos que el espectro óptico de nuestro sistema cambia, ya que éste es muy sensible a cualquier variación de las longitudes de las fibras por muy leve que ésta sea. Ésto a su vez provocará cambios en las cavidades que se forman en nuestro sistema, que será crítico a la hora de condicionar los modos con emisión de línea dentro de la misma, complicando la reproducción exacta de la estructura.

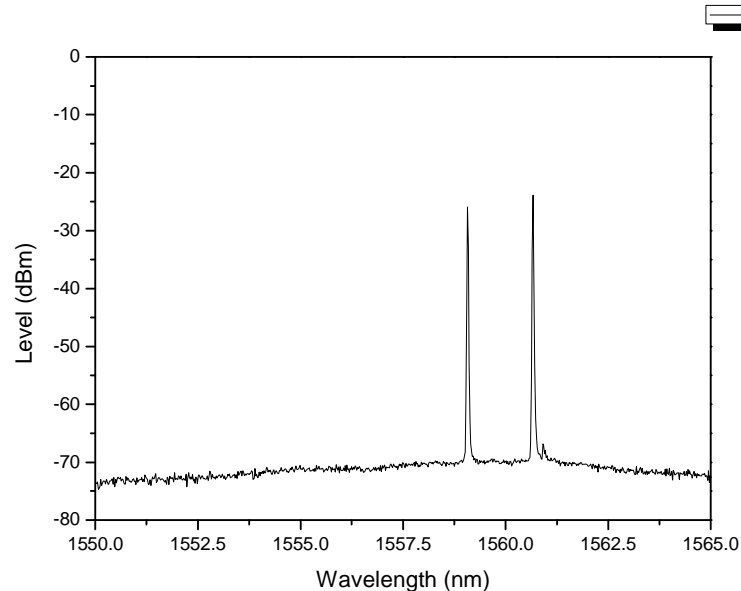


Figura 4.3.7. Esquema sin bombeo

La siguiente estructura que analizamos se compone de: una fibra SMF de 9 cm de longitud en una rama del 50:50 y un FBG sintonizable en la otra, con el fin de encontrar un comportamiento monomodo del sistema que adquiera la propiedad de que sea sintonizable.

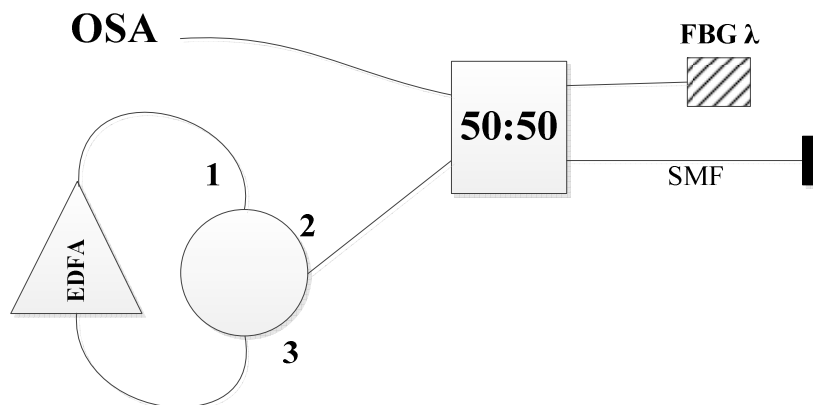


Figura 4.3.8. Esquema con FBG sintonizable

El rango de longitudes de onda que adquieren la condición de láser con esta estructura es $\approx [1560 \text{ a } 1562 \text{ nm}]$. El FBG sintonizable no entra en ese rango, aunque haciendo un barrido con el mismo se consigue obtener una longitud de onda con condición láser, que es sintonizable. De la prueba sacamos el rango en el cuál conseguimos que alguna longitud de

onda tenga condición de láser para el FBG sintonizable de 1550,6 a 1555,6 nm (en un ancho de 5 nm), a partir de 1553 nm desaparecen los modos producidos con la SMF, y sólo queda la longitud de onda del FBG.

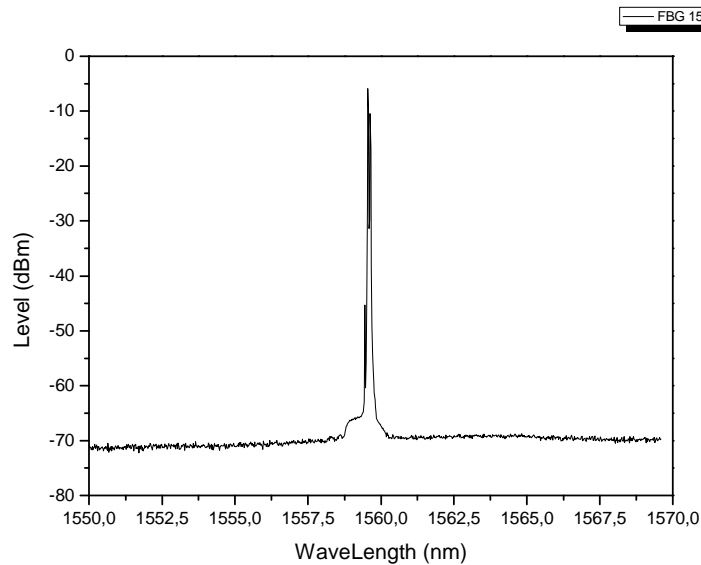


Figura 4.3.9. Con un FBG fijo a 1559,5 nm

Logramos así láser estrecho, monomodo y con buena estabilidad, pero sobre todo con una buena OSNR de aproximadamente 60 dB.

Una forma de comprobar que las fibras que utilizamos de Er-80 están bien espejadas es la que sigue: manipulamos la misma estructura pero con las fibras Er-80 sin espejar (sólo un corte perpendicular al eje de la fibra y ambas de aproximadamente la misma longitud de las que queremos comprobar). Para este caso el nivel de señal óptico es de -25 dBm y para el original aproximadamente -12 dBm. En el caso original si estuviesen bien espejadas tendríamos el 99% ($\approx 100\%$) de la señal reflejada, para el segundo caso sólo el 4%. La diferencia entre ambas es de 13 dB que es el 5% así que los resultados cuadran correctamente.

Utilizando la estructura Michelson con ambas fibras Er-80, realizamos diversas pruebas como sensor térmico.

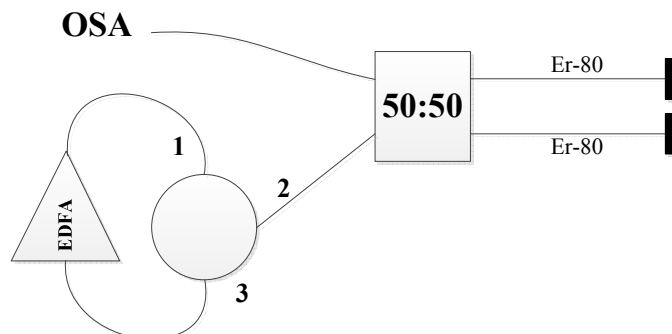


Figura 4.3.10. Estructura analizada como sensor

Reducimos el nivel del EDFA al mínimo (15dB), puesto que con menos nivel de amplificación se observa que la estructura mejora su comportamiento.

Ésto es debido a que habrá menos competencia de ganancia al haber menos modos que consiguen la condición de láser, por lo que así se mejora la estabilidad del sistema.

Realizamos una captura con el OSA (SPAN 5 nm, RBW 0,01 nm y modo Adaptativo), en la situación inicial del sistema en condición de reposo.

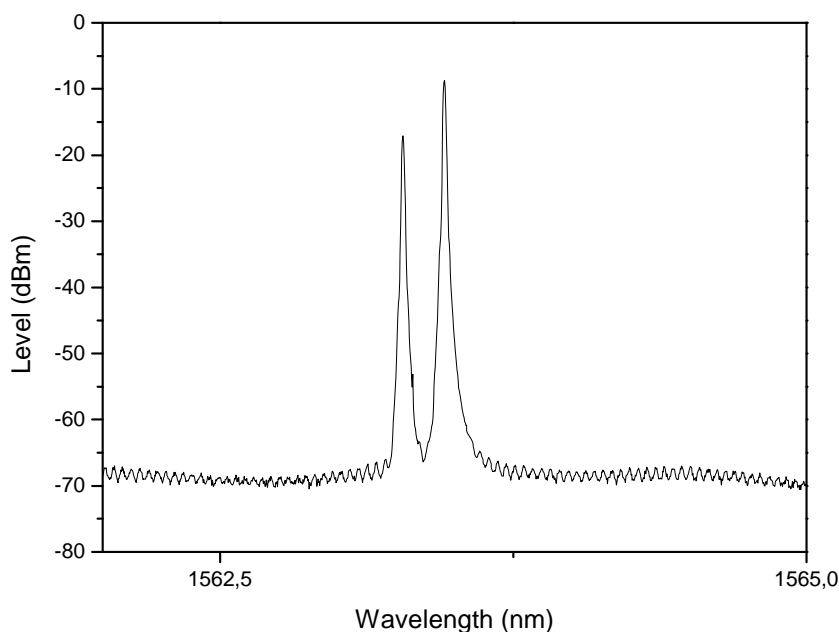


Figura 4.3.11. Espectro de la estructura

La primera longitud de onda con la condición de láser tiene un nivel de señal óptica en torno a -16 dBm y para la segunda es de alrededor de -8/-9 dBm.

Esta segunda longitud de onda es la que más nos va a interesar para realizar la siguientes pruebas, ya que tiene una OSNR de aproximadamente 60 dB (mayor que la otra longitud de onda) y a simple vista parece más estable (más tarde lo comprobaremos analíticamente).

En la tabla que hay a continuación viene indicada la inestabilidad tanto en potencia óptica de salida como en longitud de onda, para un nivel de confianza del 100%.

Datos de inestabilidad C.L del 100%	
Amplitud (dB)	0,893
Longitud de onda (nm)	0,12

Tabla 4.3.1. Inestabilidad Amplitud C.L del 100%

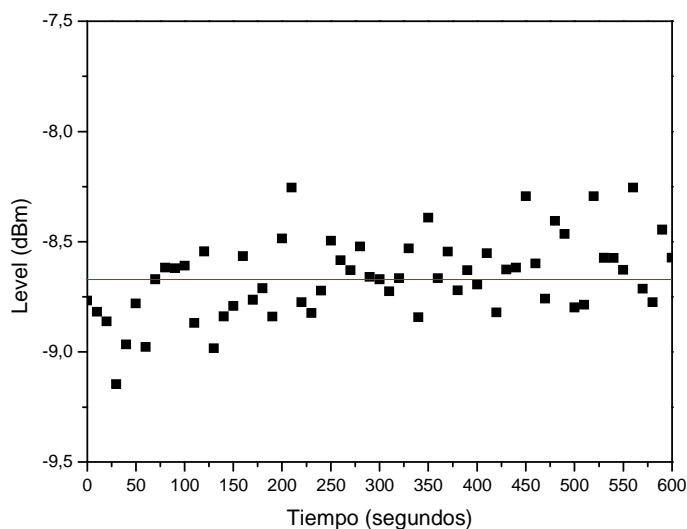


Figura 4.3.12. Valores estabilidad de la estructura

La siguiente imagen es una captura con el BOSA (SPAN de 2 nm y un RBW de 0,08 pm). Se debe destacar que las dos longitudes de onda con condición láser son monomodo.

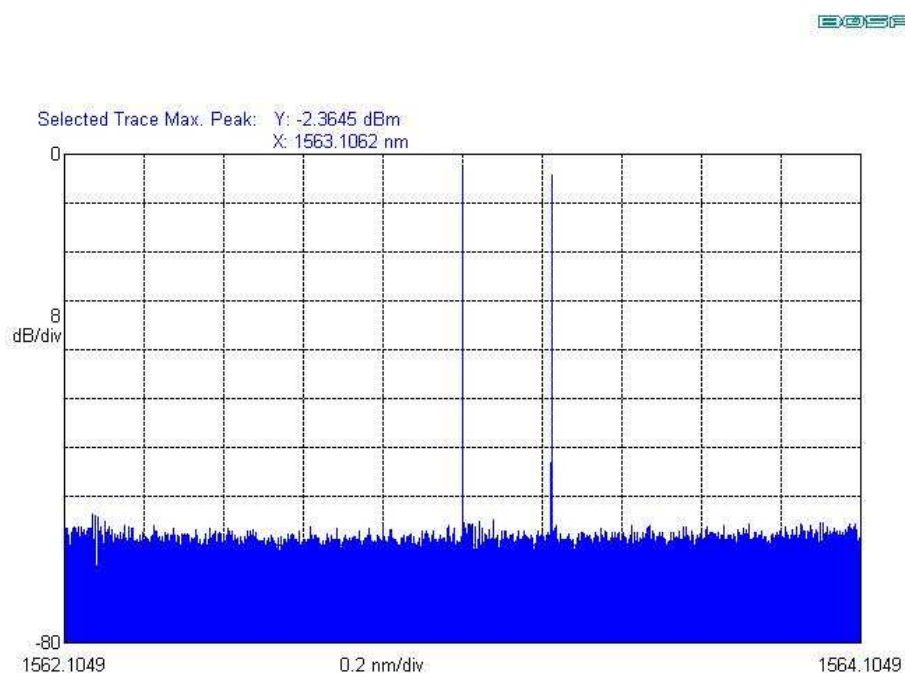


Figura 4.3.13. Captura del BOSA del esquema

Tenemos un láser con un comportamiento potencialmente utilizable en sistemas sensores, con dos longitudes de onda que tienen emisión de línea monomodo, una de ellas presenta una inestabilidad < 1 dB y una OSNR de 60 dB.

Sometemos al sistema a una prueba como sensor térmico. Colocamos sobre ambas fibras un soporte caliente, para analizar el efecto que el calor produce en su comportamiento.

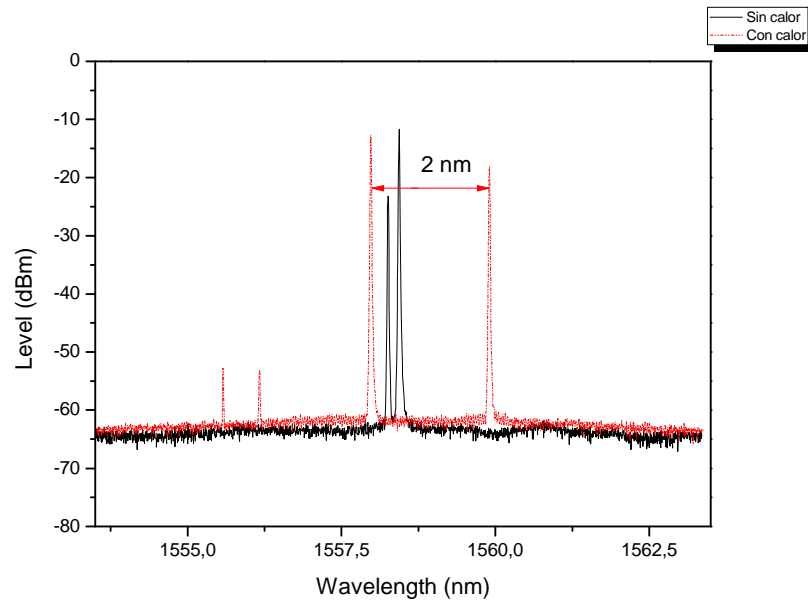


Figura 4.3.14. De color negro la estructura sin aplicarle calor, en color rojo después de aplicarle calor

Observamos que los cambios en el espectro son debidos a la presión provocada por el dispositivo utilizado para hacer la prueba como sensor térmico. En la siguiente figura vemos el espectro de color rojo cuando colocamos el dispositivo sobre ambas fibras y negro en la situación de reposo inicial sin ejercer presión.

Se distingue que la condición inicial en ambos casos de estudio es la misma (espectro de color negro), y vemos que la presión que ejerce el dispositivo es la causante del desdoblamiento de las dos longitudes de onda que se producen en el mismo. Hay una separación espectral de aproximadamente 2 nm. Aunque el espectro es “el mismo” vemos que las longitudes de onda se han desplazado, por efecto del calor (los dos casos de color rojo).

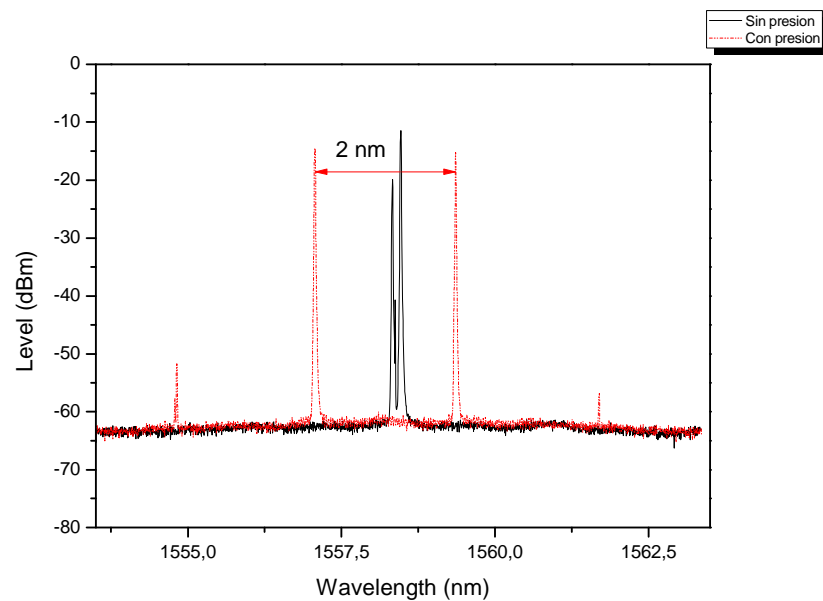


Figura 4.3.15. De color negro la estructura sin presión, en color rojo después de depositar el dispositivo

El hecho de aplicar calor a la estructura no afecta a su nivel de señal óptica (≈ -12 dBm). Proseguimos realizando una prueba de estabilidad aplicando calor en la estructura, realizando 60 capturas con un espacio de tiempo entre dos consecutivas de 10 segundos, como hemos explicado en pruebas anteriores.

Datos de inestabilidad C.L del 100%	
Amplitud (dB) $\lambda 1$	1,71
$\lambda 2$	6,615

Tabla 4.3.2. Inestabilidad Amplitud C.L del 100% con calor

Al comparar estos resultados con los calculados previamente (0,893 dB) vemos que la inestabilidad ha empeorado 0,817 dB, como cabría esperar, ya que enfriar la fibra óptica (con nitrógeno 77° K, por ejemplo) es un método que se utiliza para mejorar la estabilidad.

Percibimos que la estructura Michelson es muy sensible a presiones, estado de los conectores y vibraciones. Aunque en las pruebas anteriores observamos que su comportamiento varía al aplicar calor a las fibras (puesto que variará el índice de refracción), tendrá un mejor funcionamiento como sensor ante: presiones, curvatura, vibraciones, estrés físico...

Intentaremos conseguir el efecto de supresión inducida de modos longitudinales introduciendo un láser sintonizable externo y que también servirá como referencia de comparación al someter a las fibras de Er-80 de la estructura a las diferentes pruebas como sensor,

A continuación se describe brevemente el efecto o la técnica conocida como “Injection Seeding” que consiste en introducir una “semilla” (láser) dentro de la cavidad de un láser, para estabilizar la salida de ambos.

Esencialmente estos láseres semilla se componen de una sola frecuencia y operan en modo de onda continua. Sin la ayuda de estos láseres el láser generado por la cavidad (denominado a veces “esclavo”) suele resonar con varios modos fluctuando en amplitud, haciendo que la salida sea muy inestable.

Si conseguimos que la frecuencia óptica de la semilla éste lo suficientemente cerca de la frecuencia de resonancia de alguno de los modos del láser esclavo, lograremos que este adquiera más potencia que el resto de sus competidores, convirtiéndose en el predominante y reduciendo la competencia entre modos y por consecuencia mejorando la estabilidad del láser.

La semilla de los láseres pueden ser de dos tipos: continua o pulsada. Para el caso pulsado se puede conseguir reducir las variaciones en la energía de salida y en el tiempo (jitter), pulso a pulso y suavizar las variaciones temporales. Un problema de esta técnica es que requiere de un láser externo para introducir la semilla, un método para solucionarlo es la self-injection Seeding [14].

Esta segunda longitud de onda se puede suprimir de varias maneras, como puede ser colocando un FBG o un FBG sintonizable. Pero el caso que vamos a estudiar nosotros es

introduciendo un láser sintonizable comercial (ANDO Modelo AQ8203 halfsize frame) en el anillo, entre el EDFA (14,5 dB) y el circulador, como se ve en la siguiente figura.

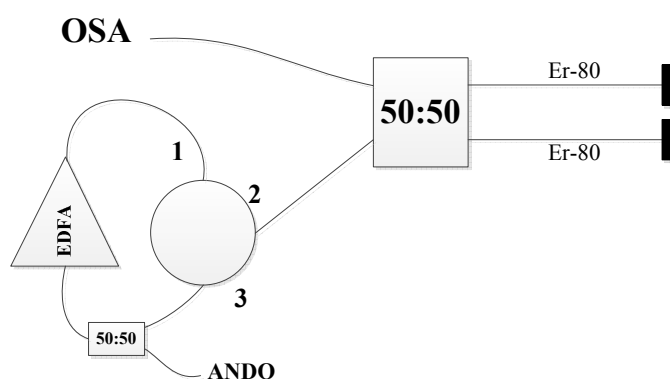
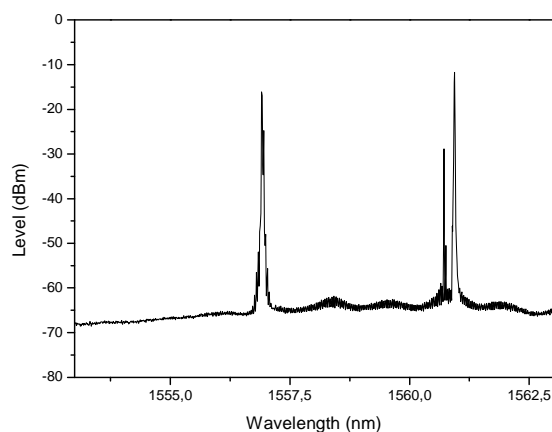
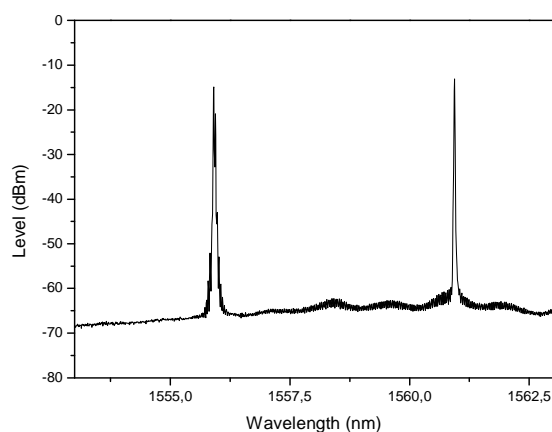


Figura 4.3.16. Esquema con Láser sintonizable Ando

La longitud de onda con condición láser que nos interesa, producida por nuestra estructura es **1560,95 nm**. En la siguiente figura se aprecian las dos longitudes de onda generadas por nuestra estructura y la que introducimos nosotros por medio del LS.



(a)



(b)

Figura 4.3.17. a) Sin suprimir el segundo lóbulo y b) Una vez suprimido

Observamos que al aproximar el LS a los valores de las longitudes de onda que genera nuestra estructura se suprime la longitud de onda no deseada.

Lo que hacemos a continuación es un barrido en amplitud de nuestro láser sintonizable a diferentes longitudes de onda, consiguiendo suprimir dicha longitud de onda no deseada.

Longitud de onda (nm)	Rango (dB)	Pico máximo (dBm)
1555,95	4,5	-11,5
1556,95	4	-11
1557,95	3,75	-10
1558,95	3,55	-11
1559,95	3,25	-10,75
*1560,45	3,5	-9
1560,70	2,5	-8
1561,20	3,25	-8,5
1561,45	3	-9,5
1561,95	2,25	-9,5
1562,95	3,5	-9,25
1563,95	2,5	-8,25
1564,95	2,85	-9,5
1565,95	2,65	-9,25

Tabla 4.3.3. Barrido con el láser sintonizable

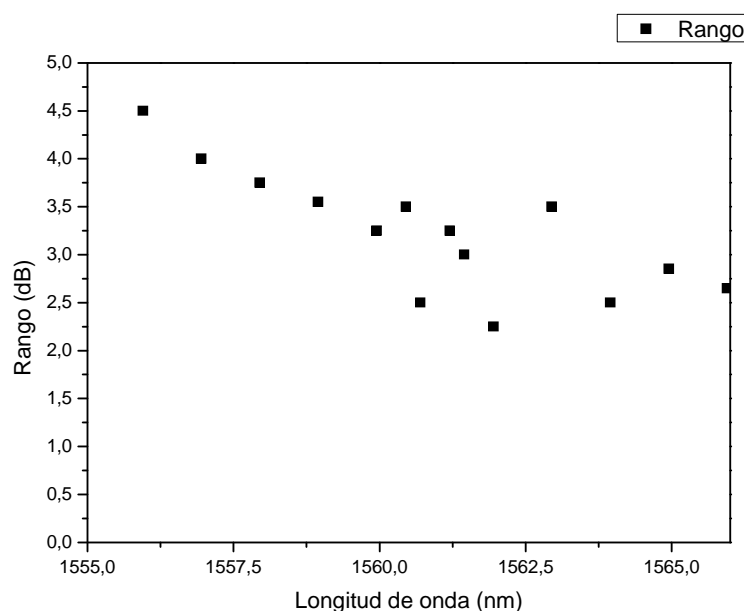


Figura 4.3.18. Gráfica de los valores de la Tabla 4.3.3.

Se aprecia una tendencia decreciente con algún valor esporádico que se sale de la misma, igualmente observamos que conforme aproximamos el láser sintonizable ANDO a la longitud de onda con la condición de láser generada por la estructura, el primero distorsiona su forma y se vuelve más ancho e inestable., por efecto del sistema.

En la figura de abajo se ve el espectro que conseguimos al introducir el LS a la longitud de onda de 1560,45 nm.

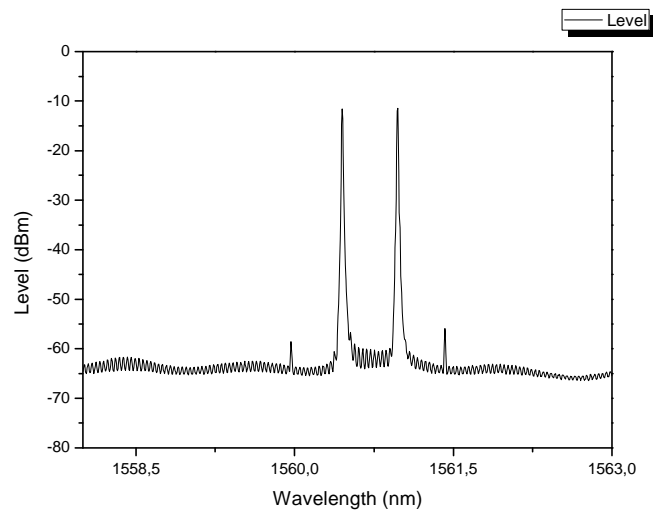
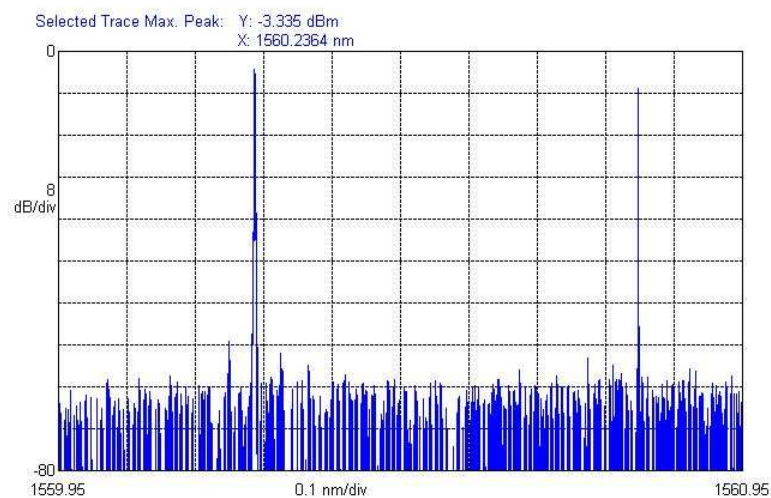


Figura 4.3.19. Espectro con el LS a 1560,45 nm

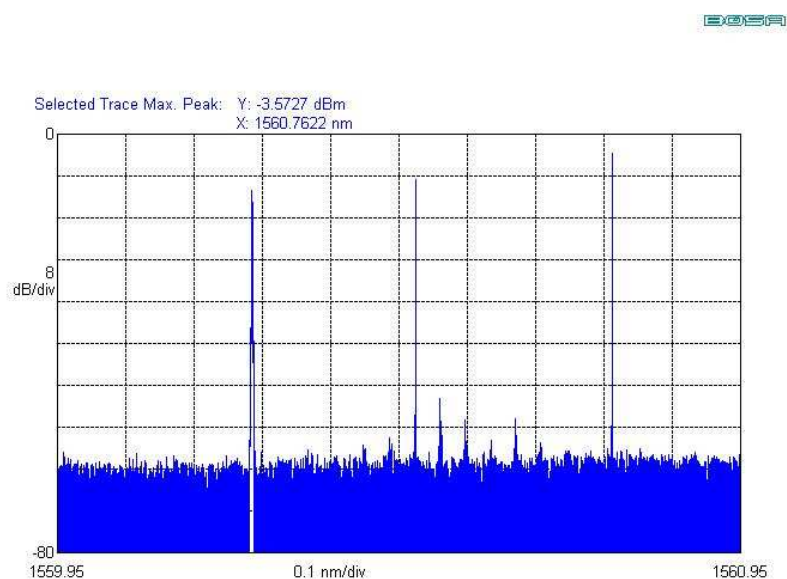
Realizamos tres capturas con la ayuda del BOSA, para analizar con más resolución los tres diversos casos que se pueden dar.

- 1) Primera situación en la que el LS suprime la longitud de onda no deseada. Sólo dos longitudes de onda tienen la condición de láser, la del láser sintonizable exterior y la generada por nuestro sistema (ambas monomodo).
- 2) Las tres longitudes de onda en emisión de línea simultaneas, también con comportamiento monomodo.
- 3) Con el LS atenuado al máximo, vemos que las dos longitudes de la estructura se comportan como monomodo. Como ocurría en la condición inicial, no sufre variación alguna. Luego el hecho de introducir el LS no afecta al comportamiento del sistema en este ámbito.

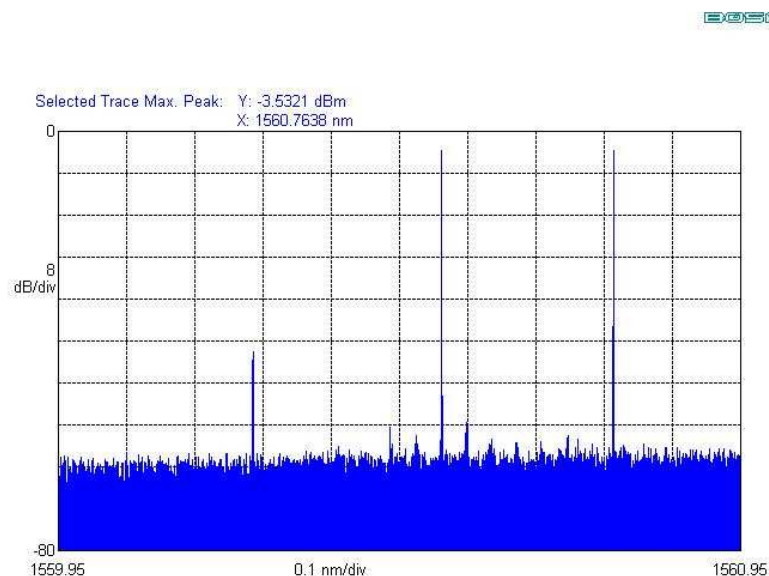
BOSA



1)



2)



3)

Figura 4.3.20. Capturas con el BOSA para los tres casos

Ahora realizamos nuevas pruebas introduciendo en el sistema dos longitudes de onda diferentes mediante el LS externo (a 1557,45 y 1561,45 nm respectivamente). Comprobamos que nuestro espectro original ha cambiado, pues ahora tenemos las dos longitudes de onda más separadas y ecualizadas en nivel de señal óptica.

En la figura que viene a continuación, tenemos una comparativa del espectro (negro) sin las dos longitudes de onda del LS y con ellas (color rojo).

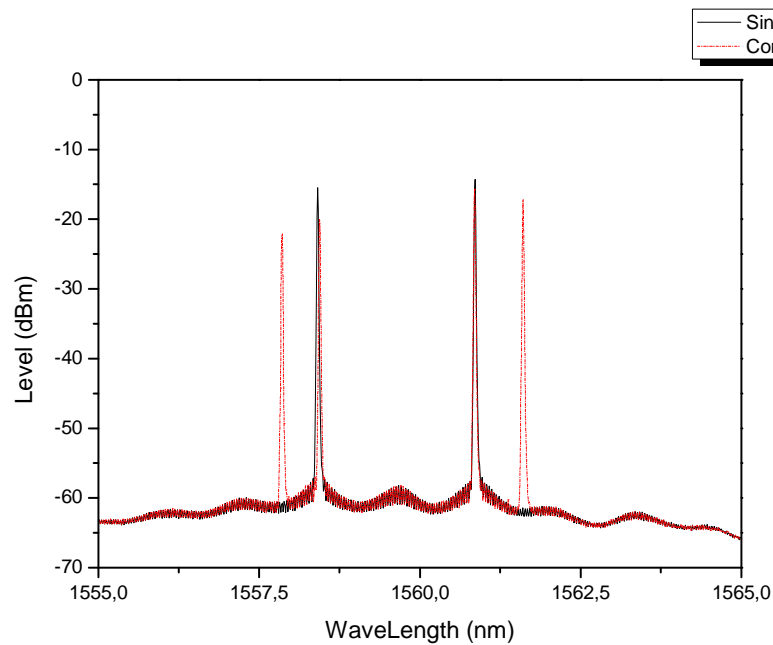


Figura 4.3.21. Espectro con dos láseres sintonizables

Al introducir dos nuevas longitudes de onda mediante el láser sintonizable, podemos controlar cuál de los dos lóbulos consigue la condición de láser. Otra alternativa sería ecualizar las cuatro longitudes de onda, para intentar mejorar la estabilidad del sistema.

Con el propósito de continuar analizando los efectos de esta técnica, montamos la siguiente estructura, que sólo difiere con la de otros casos de estudio por la presencia de un acoplador 50:50 a la salida (3 dB de pérdidas) para así tener dos ramas de salida una conectada al OSA y otra al BOSA y poder analizar si el comportamiento de emisión de línea es monomodo o no a “tiempo real”.

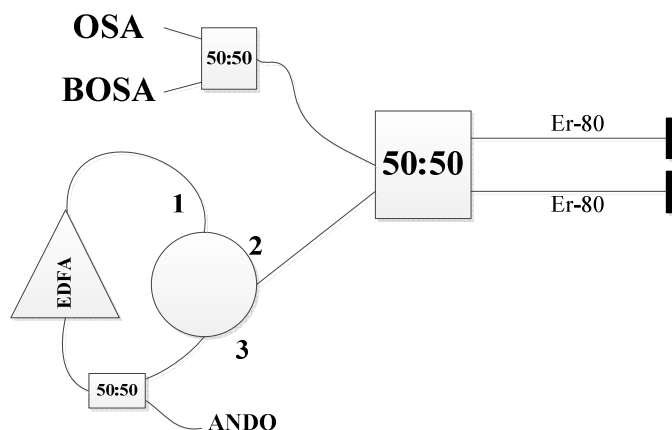


Figura 4.3.22. Esquema de la estructura, OSA y BOSA

Se trata de una estructura difícil de reproducir, como observamos en el espectro óptico que esta misma produce. Para la situación original, tenemos el láser sintonizable (ANDO) a 1558 nm y las dos emisiones de línea generadas por nuestra estructura.

Procederemos a hacer un barrido, desplazándonos en términos de longitud de onda y variando el nivel de señal óptica de nuestro LS, para ver el rango en que nuestro sistema suprime una de las dos longitudes de onda y/o vuelve el comportamiento de éstas monomodo (similar al estudio previo realizado).

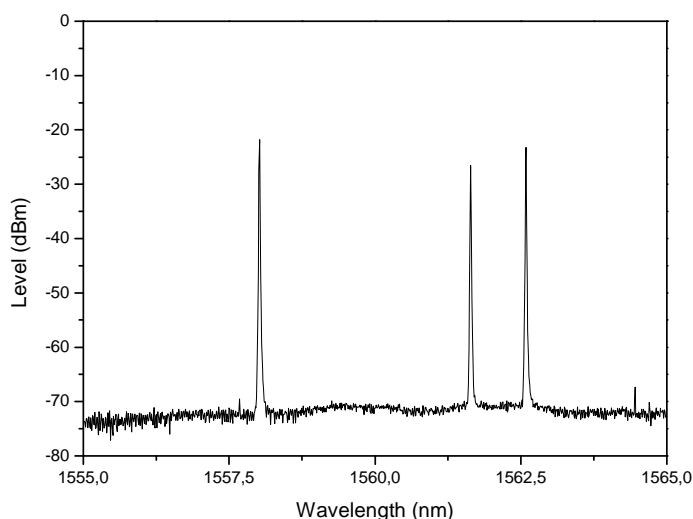


Figura 4.3.23. Espectro de nuestra estructura más el LS ANDO

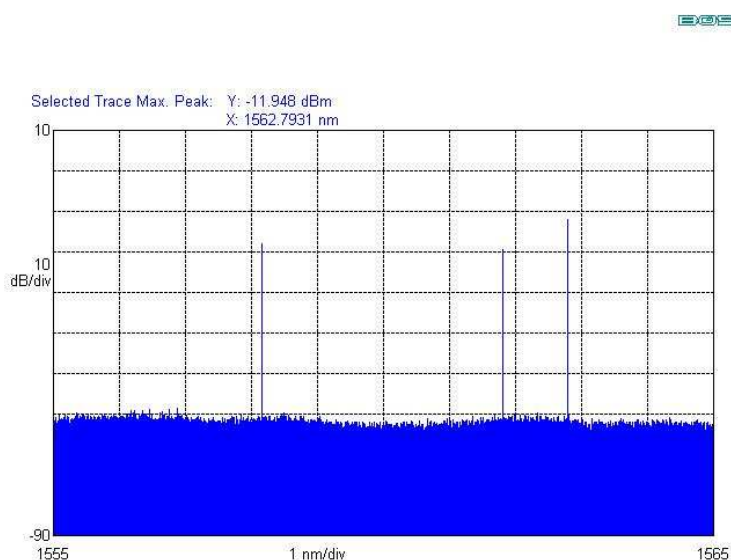
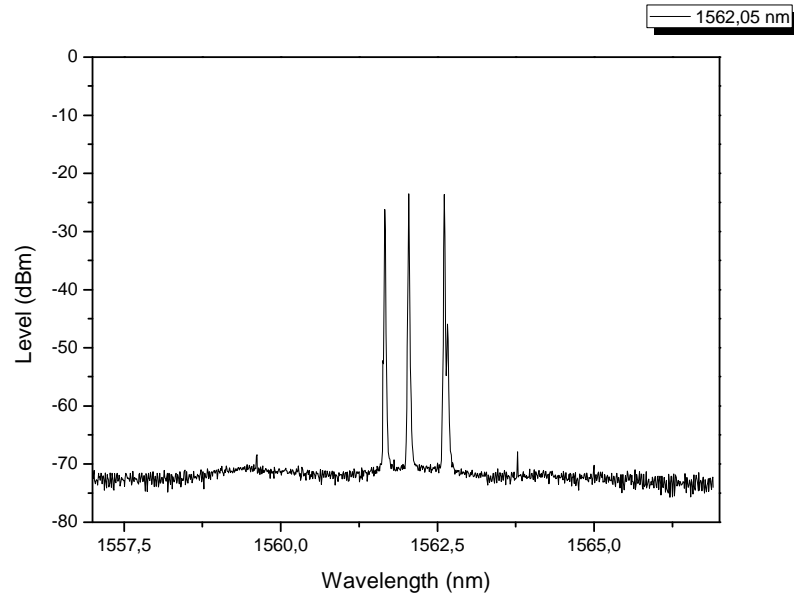


Figura 4.3.24. Captura con el BOSA del sistema

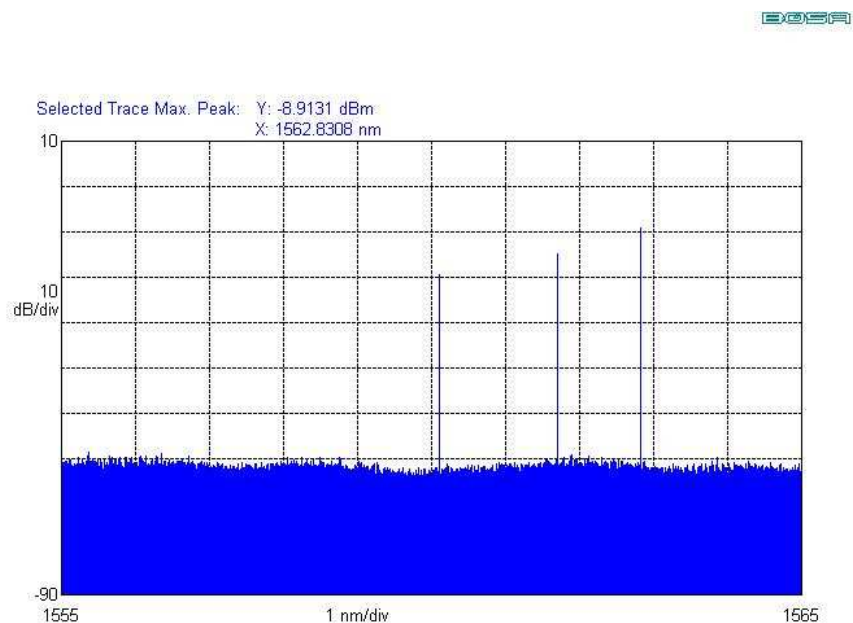
Con la ayuda del analizador de espectro óptico de alta resolución (BOSA) observamos que las tres longitudes de onda tienen emisión de línea con un solo modo.

Después de realizar un barrido a diferentes longitudes de onda con el láser sintonizable (1558, 1559, 1560, 1561, 1561.5, 1563, 1563.5, 1564 y 1565 nm) y variando éste en amplitud con la ayuda de un atenuador variable, concluimos que para este caso la estructura es muy inestable,

fluctúan tanto las longitudes de onda de emisión como la potencia óptica de salida de las mismas y también que el hecho de introducir un LS externo en este caso no produce la supresión inducida de modos longitudinales, salvo en el caso en que este se convierte en el predominante y suprime ambas. Un caso extremo es cuando insertamos el LS entre las dos emisiones de línea (1562,05 nm) y ecualizamos en amplitud.



(a)



(b)

Figura 4.3.25. a) Espectro LS 1562,05 nm en el OSA y b) BOSA

A pesar de ser un sistema muy inestable como hemos comentando previamente, siempre que alguna longitud de onda alcanza la condición de láser lo hace de forma monomodo.

A continuación realizaremos una serie de test para comprobar la teoría del “Injection Seeding”, introduciendo con la ayuda del LS una “semilla” a 1559,5 nm.

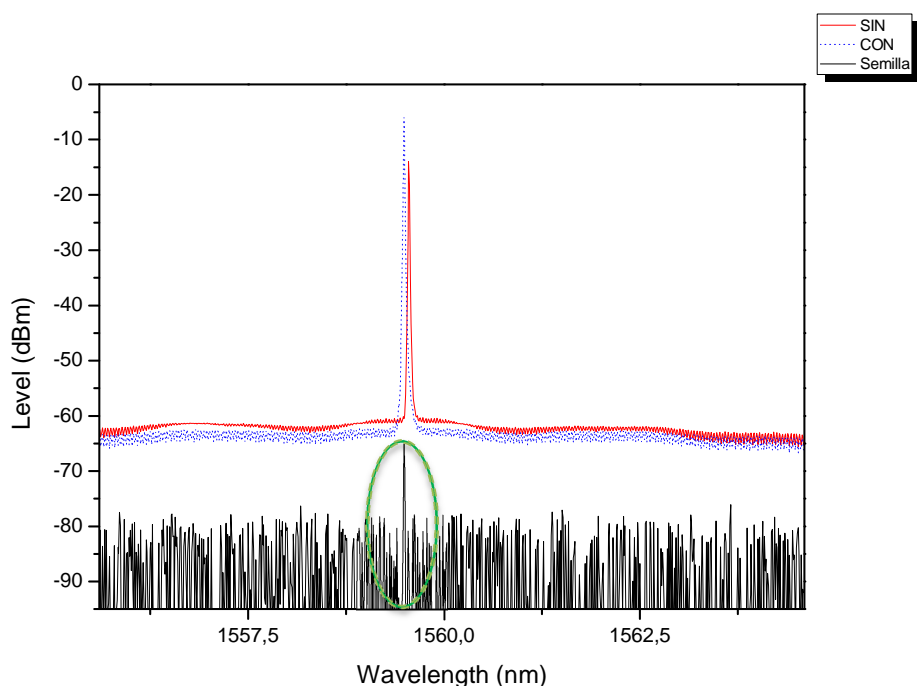


Figura 4.3.26. Injection Seeding 1559,5 nm

Esta longitud de onda se convierte en la predominante, suprimiendo al resto y dotando al sistema de una mejor estabilidad aparentemente.

Podemos observar que esto se ha obtenido colocando una semilla a la longitud de onda dada y con apenas un nivel de señal óptica de -65 dBm.

Inestabilidad de potencia óptica de salida (dB)

C.L. 100 %	6.5890
C.L. 99 %	6.4540
C.L. 90 %	5.6070
C.L. 75 %	4.3210
Longitud de onda λ (nm)	0

Tabla 4.3.4. Inestabilidad del sistema con Injection Seeding

Aunque los datos de la inestabilidad a diferentes niveles de confianza no son buenos en sí, el hecho de poner la semilla ha conseguido estabilizar la estructura, ya que antes variaba constantemente en longitud de onda, manteniéndose ahora fija para el valor de nuestra semilla (1559,5 nm). Paralelamente disponemos de unos valores de inestabilidad de potencia óptica

de salida de $\approx 4,5$ dB, cuando sin la semilla ni si quiera era viable realizar una prueba de inestabilidad del sistema.



Figura 4.3.27. Captura BOSA Injection Seeding 1559,5 nm

También observamos que el hecho de introducir el acoplador (esto implica 3 dB de pérdidas/atenuación) en el anillo de ganancia donde se encuentra el EDFA altera el espectro que produce nuestro sistema. Así sustituimos el acoplador 50:50 y el láser ANDO por un atenuador variable como se ve en la próxima figura y analizamos el comportamiento de la estructura al variar el valor de atenuación introducido.

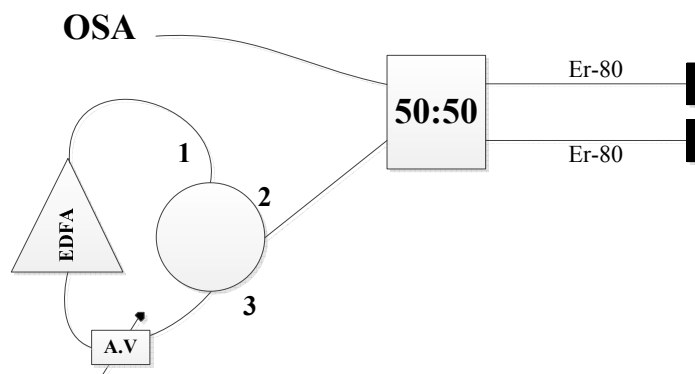


Figura 4.3.28. Esquema de la estructura con el atenuador variable

El valor del atenuador variable para el cual la estructura tiene el comportamiento con mejores resultados es de 1,3 dB, es decir aquel en el que el sistema es más estable y con mejor OSNR. De esta manera nos valdría con un EDFA comercial de menor ganancia aún del que tenemos actualmente, ya que estamos trabajando al mínimo y se comporta mejor introduciendo atenuación. Conforme aumentamos la atenuación el efecto que se consigue es que la longitud de onda que alcanza la condición de láser varíe y esta se desplace hacia la izquierda (a

longitudes de onda inferiores). En la siguiente captura del espectro se pueden apreciar diversos lóbulos, como una especie de rizado, en donde se encuentran las longitudes de onda que consiguen la emisión de línea.

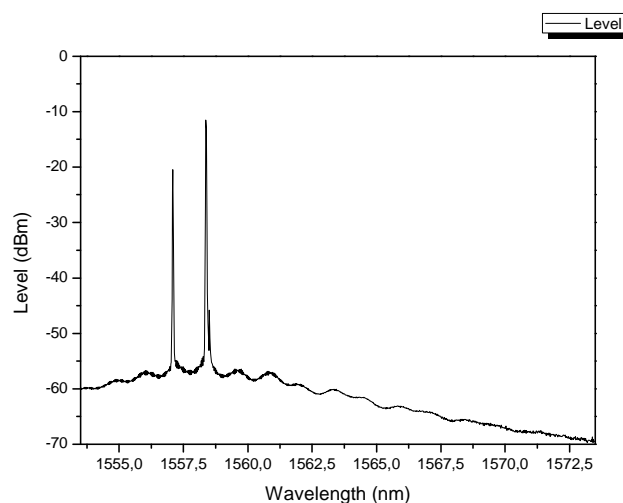


Figura 4.3.29. Espectro con el atenuador variable

Efectuamos pruebas de presión sobre ambas fibras, por lo que realizamos un estudio colocando diferentes pesos de forma ascendente (20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300 y 400 gramos) sobre las fibras fuertemente dopadas Er-80 de Liekki y observamos los efectos que se producen sobre el espectro óptico.

Se observó que la estructura se volvía muy inestable, perdiendo también su condición de emisión monomodo (como era de esperar al volverse inestable), pero no se pudo caracterizar ningún efecto o comportamiento relacionado con la presión aplicada al sistema, debido a la propia inestabilidad que se produce en el sistema por la presión ejercida. Puesto que con la primera prueba no se consiguió caracterizar el sistema como sensor, nos pareció interesante realizar un segundo estudio de presión alternativo. En él se trataba de medir y caracterizar los efectos que se producían al ejercer presión sobre una única fibra en diferentes posiciones de la misma. Por lo que colocamos una pesa de estándar de 50 gramos en el extremo espejado de la fibra y la fuimos desplazando de un 1 cm en un 1 cm con respecto del espejo.

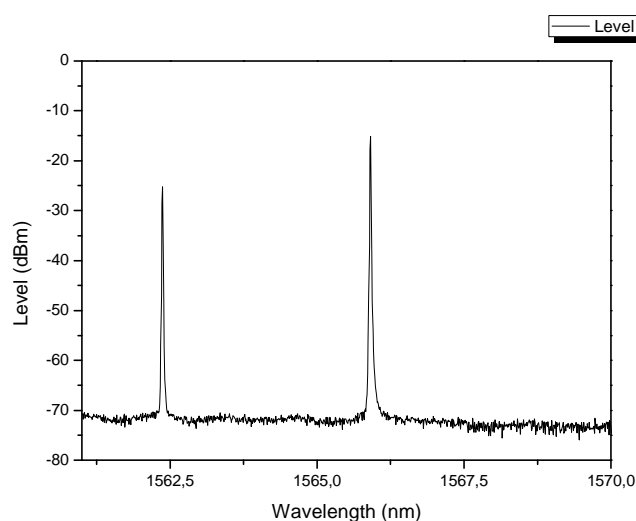


Figura 4.3.30. Espectro inicial de la prueba

Posición con respecto al espejo (cm)	Longitud de onda (nm)
Sin peso	1565,91
0	1565,96
1	1566,10
2	1566,28
3	1565,51
4	1565,51
5	1565,45
6	1565,38
7	1565,53
8	1565,85
9	1565,86

Tabla 4.3.5. Peso (50 gr) a diferentes distancias del espejo

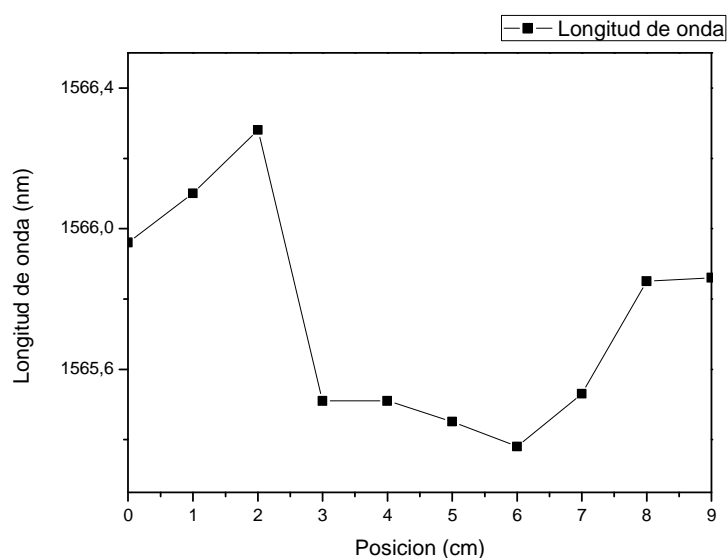


Figura 4.3.31. Relación Longitud de onda vs distancia respecto al espejo

A parte de los diferentes experimentos como sensor de presión realizamos nuevas pruebas para caracterizar su comportamiento ante las vibraciones. Situamos las fibras sobre un sistema generador de vibraciones que conectado a un generador de señales generará la onda que marcará el patrón de vibración del dispositivo.



Figura 4.3.32. Sistema generador de vibraciones

En la siguiente figura se puede apreciar el espectro para la condición inicial de la prueba, sin vibración alguna.

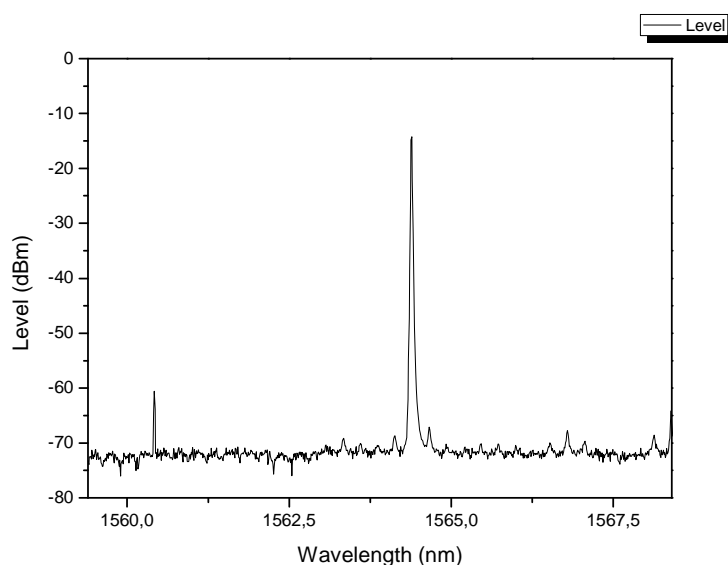


Figura 4.3.33. Espectro inicial de la prueba del shaker

Con la ayuda del generador de señales, logramos generar una señal sinusoidal de 5 Vpp y frecuencia 10 Hz como patrón de vibración. Observamos la respuesta de nuestro sistema frente a tal acción. Podemos fijarnos en como cambia el espectro óptico en sí o hacer un zero-span. Hacemos ZERO-SPAN en el OSA para centrarnos en una sola longitud de onda (1568,39 nm) y así ver como varía esta durante el tiempo.

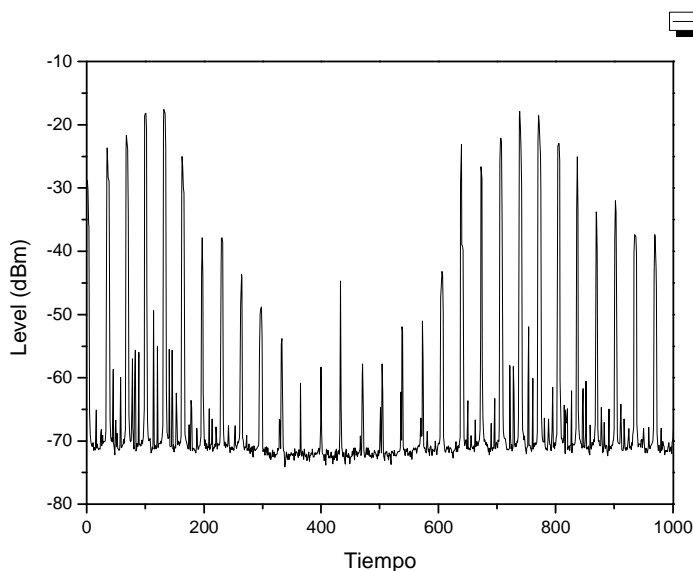


Figura 4.3.34. ZEROSPAN a 1568,39 nm

A partir de los 15 Hz, no se puede apreciar la variación del pico de la señal óptica de la longitud de onda con condición láser. Dicha longitud se vuelve muy inestable. Las pruebas fueron realizadas para los siguientes valores: con 5 Vpp y frecuencia 50 Hz.

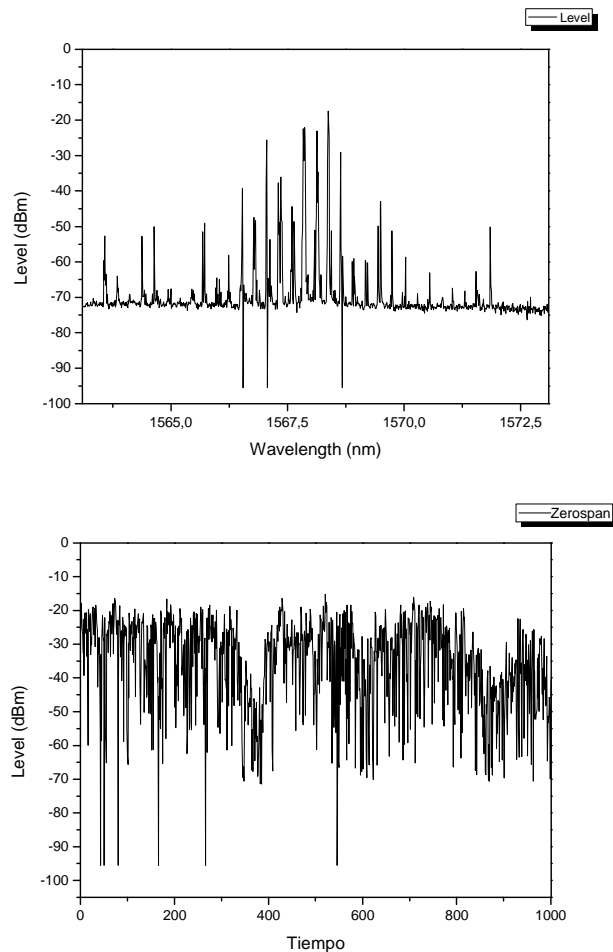
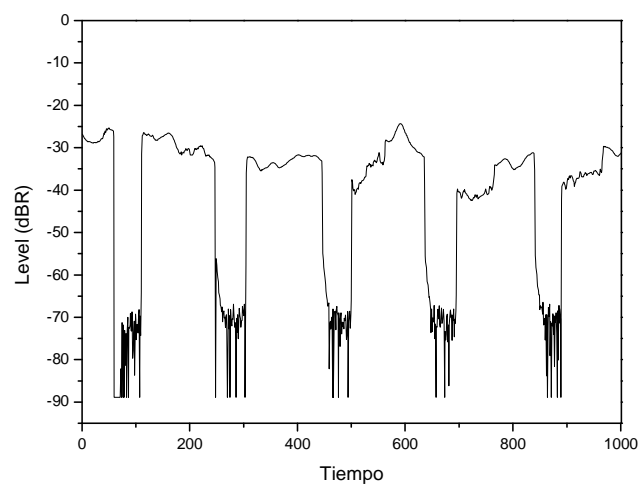


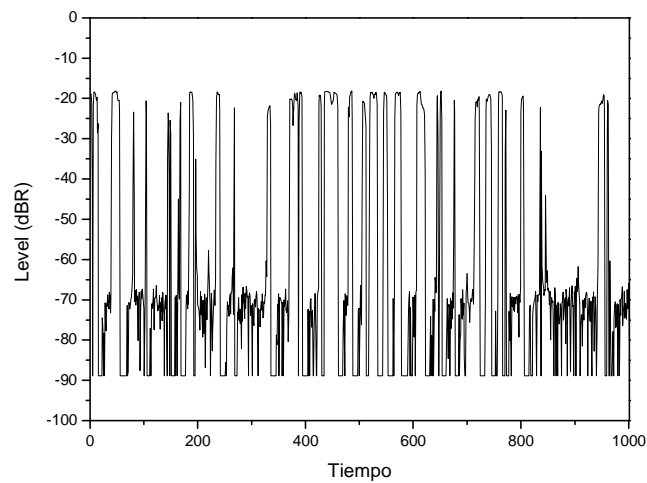
Figura 4.3.35. Primera figura espectro de la señal y segunda ZERO-SPAN de la misma (1568,12 nm)

A continuación se muestran los diversos espectros que se obtienen en el OSA del sistema cuando aplicamos diferentes tipos de ondas al generador de señales conectado al sistema generador de vibraciones.

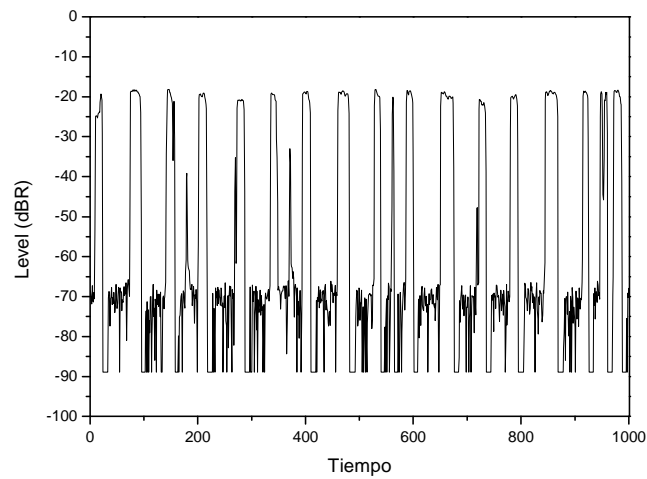
Sinusoidal



Cuadrada



Triangular



Rampa

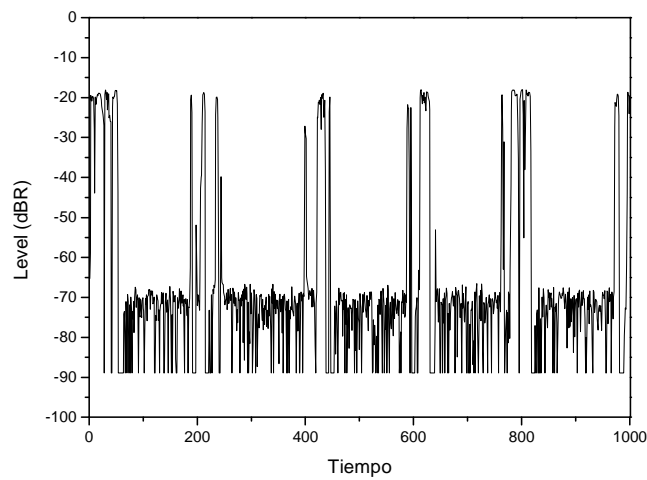


Figura 4.3.36. a) Sinusoidal, b) Cuadrada, c) Triangular y d) Rampa

Realizamos pruebas en la estructura sometida a estudio utilizando un láser de bombeo Raman.

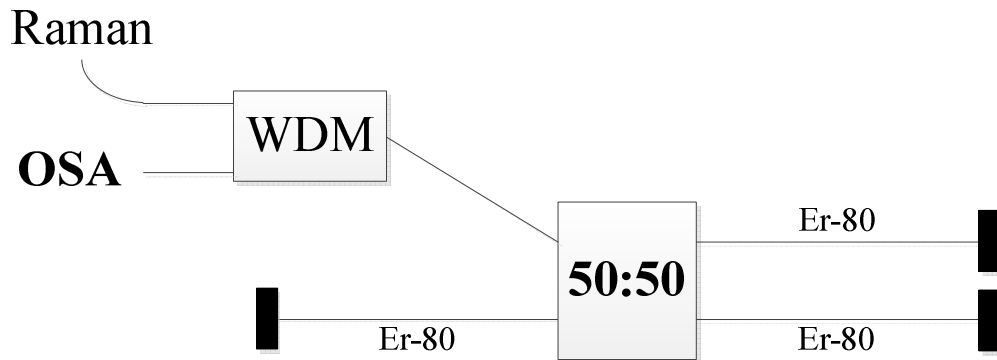


Figura 4.3.37. Estructura Fox-Smith con bombeo Raman

Volvemos a la situación inicial de la estructura Fox-Smith. Con tres ramas del acoplador soldadas a fibras fuertemente dopadas con Erblio (Er-80) y esta vez utilizamos bombeo óptico Raman a 1448 nm con potencias que van de 1 a 1,5 vatios.

Observamos que no se consigue que ninguna longitud de onda obtenga la condición de láser, el espectro es plano en torno a 1550 nm (que es nuestra región de interés, la tercera ventana de las comunicaciones ópticas). Se deriva que la estructura es incapaz de absorber la potencia del láser de bombeo Raman y conseguir la amplificación que se está buscando.

Para suplir esta carencia intercambiamos una fibra de Er-80 que está soldada a una rama del acoplador, por el EDFA con el circulador, la misma solución que ya utilizásemos en los primeros apartados de este estudio. Con el bombeo (hasta ≈ 1 W) lo único que observamos es que:

- Sube el nivel del ruido, pero no el de la señal óptica. Aumentar la amplificación no conlleva por ende el aumento de la relación señal a ruido.
- El sistema parece muy inestable en términos de longitud de onda y de potencia de salida (P_{out}).

Intercambiamos una de las ramas con fibra Er-80 por una SMF de mayor longitud. Con el fin de introducirla en una cámara climática y realizar pruebas controladas de temperatura y analizar el comportamiento del sistema como sensor térmico. Pero tampoco obtuvimos resultados válidos, aun introduciendo un tramo de fibra DCF, sólo apreciábamos el bombeo y residuos en escalera del mismo.

También se concluye que la longitud de los tramos de fibra que se utilizan en el diseño de la estructura, así como la relación entre ellos son críticos a la hora de obtener un láser con buenas prestaciones, tanto OSNR como estabilidad. Y que el bombeo (es indiferente a 980 nm de 200 o 400 mA, o incluso Raman de hasta 1,5 vatios) es insuficiente para provocar amplificación en el sistema. Haciendo necesario otro método para obtener ganancia (en nuestro caso un EDFA comercial de 21 dB).

Igualmente se comprobó que el hecho de sustituir un espejo por FBG, hace que obtengamos una estructura láser la cuál genera una longitud de onda con condición láser muy estrecha, con buena OSNR y con característica monomodo, corroborando lo que venía presupuesto de otros estudios que se han realizado de dicha estructura.

Con la ayuda de un láser exterior sintonizable (ANDO), logramos tener selectividad en cuanto a la longitud de onda que obtiene la condición de láser en nuestra estructura, obteniendo una mejora en la estabilidad y la capacidad de ecualización del sistema en sí. Además al realizar estas pruebas nos dimos cuenta, de que el hecho de introducir un factor de atenuación en el anillo de ganancia del sistema influye considerablemente en el espectro que produce el mismo.

Del estudio realizado cuando ejercemos presión sobre las fibras con diferentes pesos observamos que la estructura Michelson se vuelve muy inestable, haciendo muy difícil caracterizar algún efecto. Se observa que conforme aumentamos el peso las λ 's se desdoblan y luego se van aproximando. Cuando hacemos un barrido en longitud con el mismo peso a diferentes posiciones de la fibra con respecto al espejo, observamos que la longitud de onda tiene una tendencia oscilante.

Con el sistema generador de vibraciones a frecuencias inferiores de 15 Hz podemos observar la variación del pico, como si fuese la envolvente de una señal modulada en AM, pero no somos capaces de observar una línea continua, porque nuestra longitud de onda con emisión de línea no es siempre la misma. A partir de 15 Hz, hay demasiada variación (inestable). Además en el espectro somos capaces de distinguir el patrón de vibración.

5. CONCLUSIONES

En el presente proyecto final de carrera se ha llevado a cabo un desarrollo de estructuras de láseres de fibra dopada con erbio, con el fin de obtener la capacidad de emisión multilínea, utilizando como filtro diversos dispositivos ópticos. Durante este proyecto se han llevado a cabo el desarrollo y el estudio de tres esquemas diferentes para láseres de fibra óptica.

En el primer esquema de láser de fibra hemos conseguido una novedosa configuración de EDFL basada en OADMs y PM-PFC interferómetro Sagnac. Logramos que cuatro longitudes de onda obtengan la condición de láser simultáneamente y unos niveles de OSNR superiores a 65 dB, lo que mejora notablemente la relación señal a ruido frente a los esquemas propuestos en otros estudios encontrados.

Estos dispositivos ópticos generan cuatro ramas que aseguran que se opera de forma unidireccional en el sistema, logrando evitar así el efecto spatial hole-burning (SHB). Además se demuestra que con la ayuda de un filtro sintonizable, se puede seleccionar la longitud de onda que alcanza la emisión de línea dentro de cada canal correspondiente al OADM.

El esquema del láser añade la posibilidad de controlar de forma independiente la ganancia de cada línea de emisión láser y de esta manera lograr una buena ecualización y así como mejorar la estabilidad del propio sistema.

En el segundo sistema, igualmente hemos propuesto y demostrado una novedosa configuración de un láser de EDFL basada en MUX-DMUXs ópticos y PM-PFC interferómetro Sagnac. Donde logramos como en el caso anterior cuatro longitudes de onda con emisiones de láser de forma simultánea y una OSNR superior a 65 dB para todas ellas. También como en el caso anterior hemos demostrado la posibilidad de seleccionar dos longitudes de onda diferentes para cada canal, sólo mediante un filtro sintonizable. Junto a esto, volvemos a lograr un control independiente de las pérdidas para cada canal del láser, mejorando el proceso de ecualización.

Como gran novedad y mejora con respecto al primer esquema obtenemos una inestabilidad de la energía inferior a 1dB y un ancho de banda óptico a -3 dB inferior a 3 pm.

Es interesante comentar que con los MUX-DMUXs es posible incrementar el número de láseres sólo mediante MUX-DMUXs de más canales.

Además cuenta con la propiedad de que las longitudes de onda operan con un solo modo (monomodo), propiedad muy importante para las comunicaciones ópticas.

Y por último la tercera estructura sometida a estudio (son dos en realidad) se trata de la Fox-Smith/Michelson. Con la que hemos comprobado que se verifica la teoría de supresión de modos longitudinales en la estructura, debido a las cavidades que se forman en ella.

Para el caso analizado en el que hemos obtenido los mejores resultados, lográbamos un láser de fibra, en el cual dos longitudes de onda alcanzan la condición de láser y ambas con una

emisión de línea monomodo, propiedad importante como hemos comentado anteriormente para las comunicaciones ópticas.

Una de las dos longitudes de onda tiene una inestabilidad de la potencia óptica de salida inferior de 1dB y una relación señal a ruido óptica de 60 dB. Igualmente hemos observado en la estructura que los tramos de fibra fuertemente dopada con Erblio (Er-80 de Liekki) se comportan como absorbente saturable.

Debido a las características mencionadas, dicha estructura será candidata para ser utilizada como prototipo de sensor térmico o de variaciones físicas, una aplicación muy demandada en este campo. Se intentó caracterizar la estructura como tal, pero sin llegar a obtener resultados reseñables se dejará como una línea futura de investigación.

Además entre otras ventajas de estas estructuras está el hecho de estar compuesta por dispositivos comerciales, lo que reduce considerablemente el coste de los mismos y que ésta adaptada a la normativa de los canales de la International Telecommunication Union (ITU).

Se han estudiado algunos aspectos de los láseres en emisión multilínea, como son la estabilidad o la capacidad de ser sintonizado, que podría ser interesante a la hora de ser utilizados y explotados comercialmente, como indican las publicaciones.

Los láseres de fibra óptica desarrollados tienen diversas aplicaciones como pueden ser: la interrogación de sensores de fibra, aplicaciones médicas, las telecomunicaciones, sistemas de comunicación con mecanismos multiplexadores (WDM), procesado de señales, calibrado de instrumentos ópticos o espectroscopia y otras. Son sistemas que cada día adquieren mayor transcendencia.

A título personal, la realización del presente proyecto final de carrera ha significado un gran paso en mi formación final como Ingeniero de Telecomunicación. Este PFC me ha permitido ahondar sobre un tema y centrarme en un campo de investigación, como en ninguna asignatura lo había hecho durante la carrera. También me ha proporcionado un mejor conocimiento y manejo del material de laboratorio, como: el OSA, el BOSA, las fibras ópticas o los diferentes dispositivos ópticos utilizados durante el mismo, ayudándome a desarrollar una cierta metodología a la hora de realizar y llevar a cabo un estudio científico de más profundidad.

Como conclusión final, se puede decir que las estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica es un tema vigente y en pleno auge. Con la realización de este proyecto se ha pretendido aportar nuevos diseños, que han sido corroborados y caracterizados experimentalmente en el laboratorio de fotónica.

6. LÍNEAS FUTURAS

Después de efectuar este PFC durante el curso académico 2011/2012 hemos obtenido una serie de estructuras láser y conclusiones que consideramos novedosas como se han plasmado en el capítulo 5 de esta memoria. Lógicamente han quedado algunas puertas abiertas a futuras líneas de investigación y desarrollo relacionadas con este campo científico, actualmente en plena expansión.

Quedan abiertas las siguientes líneas de investigación para posteriores etapas de desarrollo:

- Conseguir estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica con más número de longitudes de onda que alcancen la emisión de línea.
- Estudiar las limitaciones que puedan aparecer y sus características de emisión. Esto se podría conseguir introduciendo más OADM en cascada en el primer sistema, o utilizar un MUX-DMUX de más canales para la segunda estructura.

Después de analizar las distintas estructuras que se han desarrollado en este PFC, hemos observado que una de las limitaciones más importantes que tenemos es la estabilidad de las mismas. Quedaría pendiente realizar pruebas e investigaciones para conseguir minimizar este problema (como enfriar fibra en nitrógeno líquido,...).

Igualmente se propone lograr caracterizar la estructura Fox-Smith o Michelson o alguna variante de las mismas como sensor térmico. Encontrar una longitud de fibra que nos permitiese obtener tanto una buena condición de láser, como que fuese viable su estudio en la cámara climática del laboratorio de fotónica. También hacer un estudio más exhaustivo sobre cómo afecta la longitud de los tramos de fibra óptica y la relación entre ellas, en la forma del espectro óptico que genera la estructura.

Resultaría igualmente interesante realizar nuevos estudios con fibras altamente birrefringentes de mayor longitud (> 3 metros), con el fin de intentar introducir más lóbulos en cada canal del correspondiente dispositivo óptico. Con el fin de lograr aumentar la selectividad en número de longitudes de onda de nuestros sistemas desarrollados, mediante el filtro sintonizable

7. PRESUPUESTO

Introducción

A continuación se realiza una estimación aproximada del coste de ejecución de este proyecto final de carrera, siendo este considerado como proyecto de investigación en una empresa. En él tendremos en consideración tanto el coste del personal implicado en su desarrollo, como el coste del material, instrumental y equipos de laboratorio empleados.

Coste del personal

Como parte del equipo tendremos a un futuro ingeniero de Telecomunicación y un responsable cualificado que asesora al mismo y revisara el trabajo realizado. El responsable dedicará aproximadamente el 20% del tiempo de su trabajo a las tareas de asesoramiento y revisión. El proyecto se llevará a cabo durante un periodo de 10 meses a media jornada.

Puesto	Sueldo media jornada (€/mes)	Cantidad (meses)	Total (€)
Ing. de Telecomunicación	600	6	3.600
Asesor Doctor	300	6	1.800

Tabla 7.1. Salario base

Al sueldo base de ambos calculado previamente, se les debe añadir las gratificaciones así como las obligaciones sociales correspondientes, que se detallan en la siguiente tabla.

Cargas sociales	Porcentaje (%)
Indemnización por despido	3
Seguro de accidente	5
Subsidio familiar	3
Subsidio de vejez	5
Abono festivos	10
Días de enfermedad	3
Plus cargas familiares	3
Gratificación extraordinaria	10
Otros conceptos	12
TOTAL	54

Tabla 7.2. Cargas sociales

Por consiguiente si a los sueldos base calculados en la tabla 7.1. les añadimos las cargas sociales correspondientes obtendremos el salario total bruto.

Puesto	Sueldo base (€)	Cargas sociales (€)	Total (€)
Ing. de Telecomunicación	3.600	1.944	5.544
Asesor Doctor	1.800	972	2.772
			8.316

Tabla 7.3. Salario total bruto

Coste del material

En el siguiente apartado se incluye el coste del material y del equipamiento, tanto alquilado como adquirido por el laboratorio. Para la correcta realización de este proyecto.

Material alquilado

Parte del material utilizado en el estudio posee un coste muy alto para su utilización en un solo proyecto, por tanto se opta por alquilarlo. A continuación se detalla todo el material alquilado.

Equipo	Coste (€/mes)	Cantidad (meses)	Total (€)
OSA Advantest Q8384	275	10	2.750
BOSA	500	8	4.000
Láser Sinto. Agilent 8164B	555	10	5.550
Láser Sinto. ANDO AQ8201	140	2	280
Láser Raman IPG RLD-3-1445	280	1	280
Láser bombeo ALD98-100	140	10	1.400
Láser bombeo ILX Lightwave LDM-4980	140	10	1.400
Controladores del laser:			
LDT-5525 Temperature controller (TEC)	125	10	1.250
LDX-3525B	125	10	1.250
EDFA Photonics 3624BT	270	2	540
EDFA APA Technologies EFA-P21	250	10	2.500
Generador de señales HP 33120^a	100	1	100
			21.300

Tabla 7.4. Material alquilado

Material adquirido

En la siguiente tabla se hace un listado en detalle del material adquirido para la realización. Otra serie de dispositivos y / o equipamiento utilizado durante el desarrollo del proyecto ya pertenecían al equipo del laboratorio.

Equipo	Coste (€/mes)	Cantidad	Total (€)
Acopladores (90:10, 70:30 y 50:50) Telnet	30	3	90
WDM 1445/1550 Comcore	45	1	45
WDM 980/1550 OPNETI	30	1	30
FBG sintonizable AOS	205	1	205
FBG AOS	115	1	115
Circulador de tres puertos	145	1	145
7m Fibra Liekki Er30	-	1	-
5m Fibra Liekki Er80	-	1	-
Control de polarización	170	1	170
Atenuador variable	100	4	400
			1.200

Tabla 7.5. Material adquirido

Coste total

Los costes calculados anteriormente forman parte del presupuesto de ejecución y material, sobre el que se calcula el beneficio industrial, y al cual se le aplica el IVA (en la actualidad del 18%).

Coste del personal	8.316
Material alquilado	21.300
Material adquirido	1.200
PRESUPUESTO de ejecución	30.816
Beneficio industrial (10 %)	3.082
PRESUPUESTO sin IVA	33.898
IVA (18 %)	6.102
TOTAL	40.000

Tabla 7.6. Coste total del PFC

En resumidas cuentas el coste total final del proyecto asciende a un montante total aproximado de cuarenta mil euros.

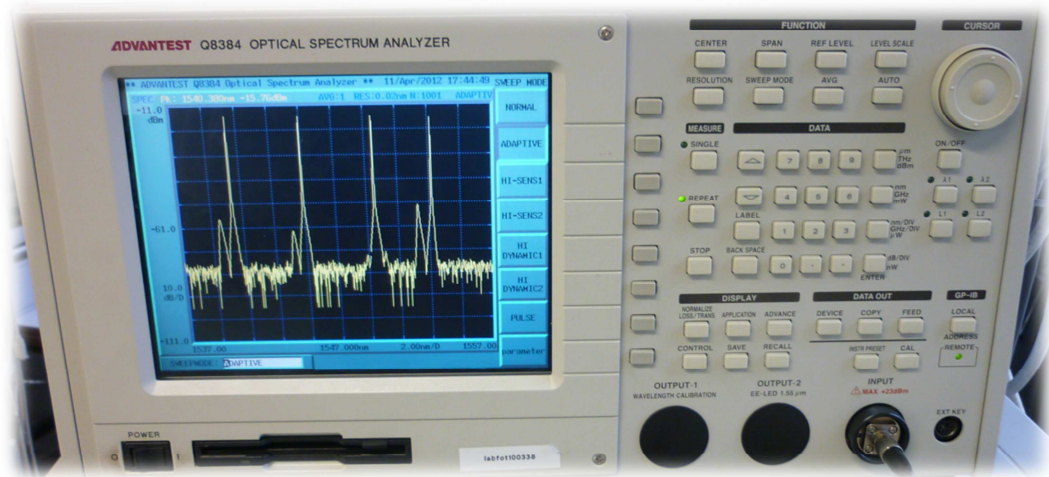
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miguel López-Higuera, “Handbook of optical fiber sensing technology”. 2002, John Willey and Sons.
- [2] Jeff Hecht, “Understanding Fiber Optics”. 5th Edition, Pearson Prentice Hall.
- [3] John M. Senior, “Optical Fiber Communications. Principles and Practice”. Ed. Prentice Hall International, 1992, 2nd Edition.
- [4] José Capmany, “Dispositivos de Comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1999.
- [5] José Capmany, F. J. Fraile-Peláez, J. Martí. “Fundamentos de comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1998.
- [6] G. P. Agrawal, “Fiber Optic Communication Systems”. John Willey and Sons Inc., New York 2002.
- [7] O’Shea, Callen and Rhodes, “An introduction to LASERS and their applications”. Addison-Wesley publishing company 1978.
- [8] “LASERS”. Anthony E. Siegman.
- [9] Svelto, “Principles of lasers”. Plenum Press 1989 (Third edition).
- [10] Isabel Arias Tobalina, “El láser, la luz de nuestro tiempo” © 2010. ISBN: 978-84-92997-10-7, D. Legal: S.1657-2010 OSAL (Salamanca Student Chapter) Departamento de Física Aplicada. Universidad de Salamanca.
- [11] Sergio Rota Rodrigo, “Desarrollo de estructuras avanzadas de fibra óptica para sensores y láseres”. Proyecto fin de máster, UPNA Pamplona 2011.
- [12] Paul Urquhart, Colin Millar, and Michael Brierley, “Fiber Fox-Smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers”. British Telecom Research Laboratories, Martlesham Heath, Ipswich, IP5 7RE England, UK 1988.
- [13] Rosa Ana Pérez Herrera, “Design and characterization of wavelength división multiplexed sensor systems using optical amplification”. Tesis Doctoral, UPNA 2010.
- [14] “Encyclopedia of Laser Physics and Technology http://www.rp-photonics.com/injection_seeding.html”.
- [15] Shoichi Sudo, “Optical Fiber Amplifiers”. (Artech House, Boston, 1997).
- [16] P. C. Becker, N. A. Olsson and J. R. Simpson, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Fundamentals and Technology”. (Academic Press, San Diego, 1999).
- [17] Antoine Bellemare, “Continuous-wave silica-based erbium-doped fiber lasers”. Progress in Quantum Electronics 27 (2003) 211-266.
- [18] P. W. France, “Optical Fibre Lasers & Amplifiers”. (Blackie, Glasgow, 1991).
- [19] Michel J. F. Dignonnet, “Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers”. (Marcel Dekker, New York, 1993).

ANEXOS

A.1. Especificaciones del equipamiento empleado

Optical Spectrum Analyzer (OSA)



Marca: *ADVANTEST*

Modelo: *Q8384*

Especificaciones:

Resolución de longitud de onda: 10 pm o mayor

Rango dinámico: 60 dB o más

Precisión de longitud de onda: ± 0.05 nm

BOSA (High resolution Optical Spectrum Analyzer)



Marca: *Aragon Photonics*

Modelo: *BOSA*

Láser sintonizable Agilent



Marca: *AGILENT*

Modelo: *8164B*

Especificaciones:

Rango: 1450-1590 nm

Resolución: 0.1p, 12.5 MHz a 1550 nm

Precisión en λ 1 pm

BW espectral: 100 KHz

Pout_{max}: 7 dBm

RIN: -145 dB/Hz

Láser de bombeo 980 nm Amonics



Marca: *AMONICS*

Modelo: *ALD98-100-B-FA*

Especificaciones:

Modo de operación: CW

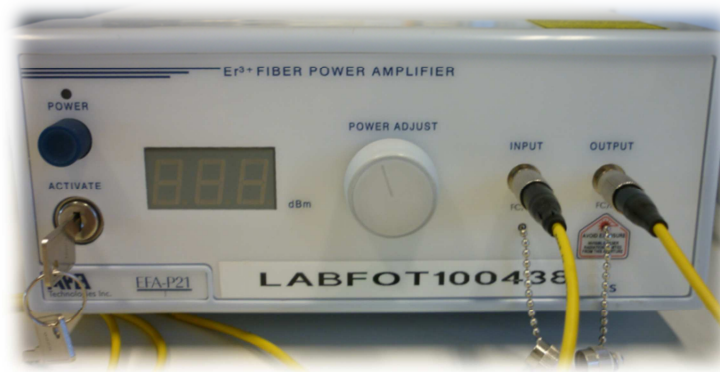
Estabilidad en potencia (8h): 0.02 dB

Longitud de onda de emisión: 976 nm

Potencia máxima: 139 mW

FWHM: 0.616 nm

Amplificador de fibra dopada con Erbio (EDFA 21 dB)



Marca: *APA Technologies*

Modelo: *EFA-P21*

Amplificador de fibra dopada con Erbio (EDFA)



Marca: *PHOTONETICS*

Modelo: *3624-BT-13*

Especificaciones:

Ganancia a pequeña señal (1530nm): 41 dBm

Ganancia a pequeña señal (1550nm): 29 dBm

Potencia de salida (-1 dBm IN a 1540nm): 14.4 nm

Factor de ruido: < 5 dB

Dependencia de la polarización: 0.2 dB

Láser Raman



Marca: *IPG Fibertech*

Modelo: *RLD-3K-1445*

Especificaciones:

Modo de operación: CW

Polarización: Aleatoria

Longitud de onda de emisión: 1445 nm

Potencia máxima: 3.2 W

Ancho espectral 3dB: 0.5 nm (min), 2.5 nm (máx.)

Supresión de lóbulo lateral: 45dB

Controladores del láser de bombeo



Marca: *ILX Lightwave*

Modelo: *LDT-5525 Temperature controller (TEC)*

LDX-3525B Precision current source

Láser sintonizable de dos longitudes de onda



El módulo láser AQ8201-13 se encuentra montado sobre una carcasa de tamaño medio AQ8203 también de ANDO.

Marca: *ANDO*

Modelo: *AQ8201-13*

Especificaciones:

Rango: 1460-1580nm

Resolución: 10pm

Precisión en selección λ emisión: $\pm 0.2\text{nm}$

BW espectral: 5MHz

$P_{\text{out max}}$: 6dBm

RIN: -145dB/Hz

Generador de señales



Marca: *HEWLETT PACKARD*

Modelo: *33120^a*

Circulador de tres puertos

Marca: *LZX*

Modelo: *CR-3-145-P-09-1FC/APC*

Especificaciones:

Pérdidas de inserción: de 1 a 2 0.6dB
de 2 a 3 0.61dB

Aislamiento: de 2 a 1 57dB
de 3 a 2 60dB

Acopladores 90:10

Marca: *TELNET*

Modelo: *2x2; 10:90*

Especificaciones:

Puerto 1: Pérdidas de inserción
PA (10%) 0.42dB
PB (90%) 0.68dB

Puerto 2: PB (10%) 0.71dB
PA (90%) 0.63dB

Estabilidad con la polarización <0.2dB

Directividad: >55dB

Acopladores 70:30

Marca: TELNET

Modelo: 2x2

Especificaciones:

Estabilidad con la polarización <0.2dB / <0.15dB

Directividad: >55dB

Acopladores 50:50

Marca: *TELNET*

Modelo: *WIC 2x2*

Especificaciones:

Pérdidas de inserción

Puerto 1: PA (50%) 3.56dB

PB (50%) 3.57dB

Puerto 2: PB (50%) 3.67dB

PA (50%) 3.33dB

Estabilidad con la polarización <0.15dB

Directividad: >55dB

Multiplexor en longitud de onda 1445/1550 (WDM)

Marca: *COMCORE*

Especificaciones:

	Puerto 1-Puerto 2	2 Puerto 1-Puerto 3
Pérdidas de inserción:	0.19dB	0.19dB

PDL: <10 <10

Aislamiento: 18.91dB 24.19dB

Donde: Puerto 1: In

Puerto 2: 1445nm

Puerto 3: 1550nm

Multiplexor en longitud de onda 980/1550 (WDM)

Marca: *OPNETI*

Modelo: *FWDM-95-2-1-FA*

Especificaciones:

Longitud de onda (canal 1550): 1520-1600 nm

Longitud de onda (canal 980): 965-1000 nm

Pérdidas de inserción (canal 1550): 0.45 dB

Pérdidas de inserción (canal 980): 0.6 dB

PDL: <0.02 dB

Pérdidas de retorno: > 60dB

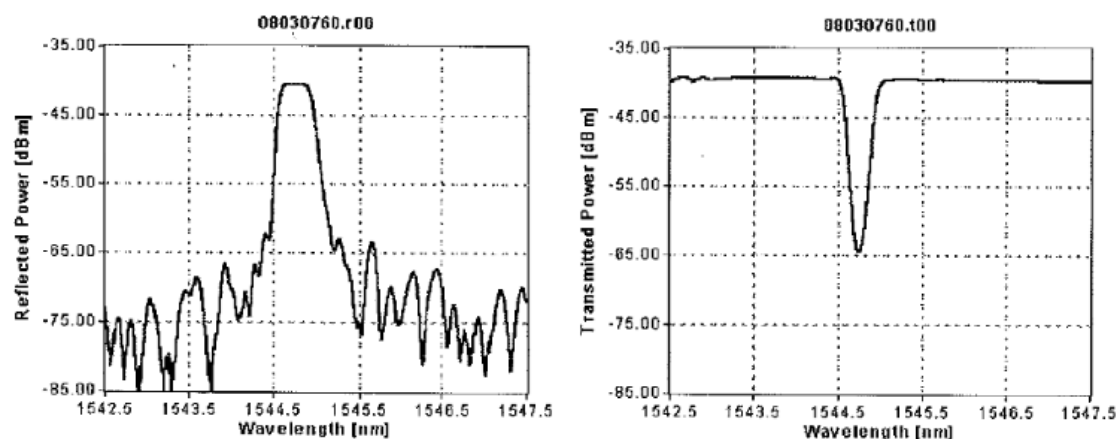
Red de difracción Bragg sintonizable



FBG Data Sheet

Company:	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	Date:	16.03.07
Address:	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	Time:	16:36:37
		SerNo:	08030760
Phone:	+49 (0)351 4960 193		
Fax:	+49 (0)351 4960 194	Customer:	428
E-mail:	info@aos-fiber.com	Order-No:	Uni Navarra P-3
Web:	www.aos-fiber.com	Operator:	Grosse

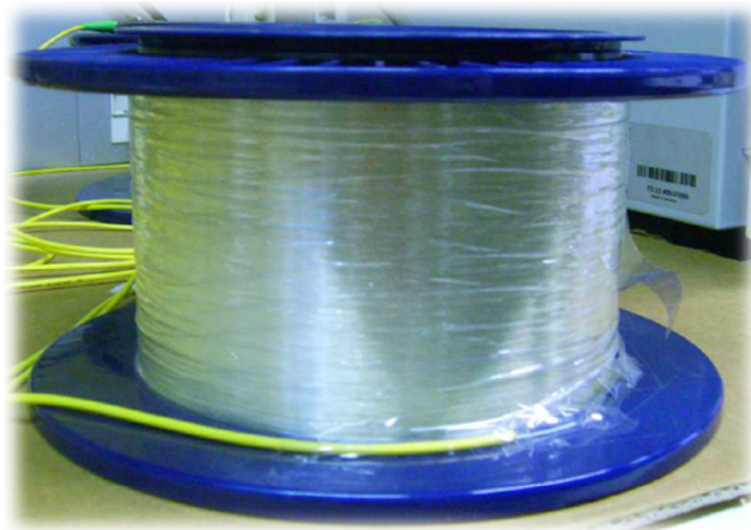
OSA traces:



Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1544.758
			Center Freq [THz]:	194.1
			Transmission Loss [dB]:	25.3
-1.0 dB	0.325	40.8	Reflectivity [%]:	99.7
-3.0 dB	0.390	48.9	SNR @+/-1nm [dB]:	26.9
-20 dB	0.664	83.5		

Fibra monomodo estándar



Marca: *TELNET*

Modelo: *SMF*

Especificaciones:

Atenuación: 0.208dB/Km

Longitud: ± 1 m

Fibra compensadora de dispersión (DCF)



Marca: *TELNET*

Modelo: *Fibra SMF*

Especificaciones:

Atenuación: 0.55dB/Km

Fibra fuertemente dopada con Erbio (Liekki Er-30)

nLIGHT LIEKKI™ Er30-4/125 – Erbium Doped Fiber



LIEKKI™ Er30-4/125 fibers are highly doped erbium fibers designed for C- and L-band amplifiers, and ASE sources. These fibers are available as low cut-off fibers (Er30-4/125) and high cut-off fibers (Er30-4/125HC).

The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20 m.

Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Very short fiber lengths reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Wide and flat spectrum
- Low polarization mode dispersion, typical value <25 fs/m
- Low splice loss, LIEKKI™ EasySplice software for splicing parameters
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Applications

- C- and L-band DWDM, Metro and CATV
- ASE sources

Fibra fuertemente dopada con Erblio (Liekki Er-80)



HIGH-POWER SEMICONDUCTOR LASERS AND FIBERS

LIEKKI™ Er80-x/125



Large Mode Area Erbium Doped Fiber

LIEKKI™ Er80-4/125 and Er80-8/125 fibers are very highly doped large mode area erbium fibers suitable for medium-power amplifiers and lasers.

Good spliceability, high doping and a large core make these fibers ideal for medium peak power pulse amplification in the eye-safe 1.5 μm wavelength region. High erbium concentration reduces required application fiber length considerably while providing strong gain and reduced non-linear effects.

LIEKKI™ Er80-8/125 fibers can be used also with 980 nm pumps.

Applications

- Short pulse amplifiers
- Medium power low non-linearity applications
- LIDAR
- Medical
- Sensing

Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Ideal for pulse amplification in 1550 nm range
- Very short fiber lengths (typically less than 2 m) reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Very good temperature behavior
- Low splice loss, LIEKKI™ EasySplice software for splicing parameters
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Typical device specification

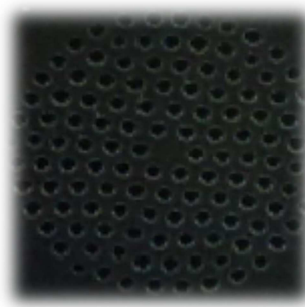
		LIEKKI™ Er80-4/125	LIEKKI™ Er80-8/125
Optical			
Mode field diameter at 1550 nm	μm	6.5 ± 0.5	9.5 ± 0.8
Peak core absorption at 1530 nm	dB/m	80 ± 8	80 ± 8
Core numerical aperture (nominal)		0.2	0.13
Cut-off wavelength	nm	800 - 980	1100 - 1400
Geometrical and mechanical			
Core concentricity error	μm	< 0.7	< 0.7
Cladding diameter	μm	125 ± 2	125 ± 2
Cladding geometry		Round	Round
Coating diameter	μm	245 ± 15	245 ± 15
Coating material		High index acrylate	High index acrylate
Proof test	%	> 1	> 1

Custom configurations also available

Notes:

nLIGHT continually improves its products to provide its customers with outstanding quality and reliability. nLIGHT reserves the right to change specifications and product descriptions at any time without notice. In addition, nLIGHT offers a limited warranty to ensure customer satisfaction. For complete details, please contact your nLIGHT sales representative.

Fibra de cristal fotónico dopada con Erbio



Cedida por la universidad de Zaragoza

Parámetros estructurales:

$D_{\text{ext}} (\mu\text{m})$	120
$D_{\text{nuc}} (\mu\text{m})$	7,45
$\Lambda (\mu\text{m})$	4,8
$D (\mu\text{m})$	2,4
d / Λ	0,5

Diámetros modales:

PCF	Diametro modal (μm)	
	980 nm	1550 nm
Tramo inicial	5,9	6,31
Tramo final	5,83	6,23

A.2. Códigos Matlab

A.2.1. Código del script de Matlab para el cálculo de estabilidades

```
%Cargar los datos en la variable data
%Dividir en cortes según los picos

format short
corte1=300;
corte2=500;
corte3=665;
%Con la variable time podremos ver las muestras en funcion del tiempo

time=0.5;

tabla=zeros(size(data,2)-1,9); %Matriz de zeros tamaño X:9
for i=2:size(data,2)
    %Introduzco en la tabla el instante de tiempo
    tabla(i-1,1)=(i-2)*time;
    %Busco el maximo en cada columna, en a meto el valor y en b la posicion
    %Para el primer trozo de espectro definido por corte1
    [a,b]=max(data(1:corte1,i-1));
    tabla(i-1,2)=b;
    tabla(i-1,3)=a;
    %Segunda parte del espectro
    [a,b]=max(data(corte1:corte2,i-1));
    tabla(i-1,4)=b;
    tabla(i-1,5)=a;
    %Tercera parte del espectro
    [a,b]=max(data(corte2:corte3,i-1));
    tabla(i-1,6)=b;
    tabla(i-1,7)=a;
    %Cuarta parte del espectro
    [a,b]=max(data(corte3:(size(data,1)-1),i-1));
    tabla(i-1,8)=b;
    tabla(i-1,9)=a;
    i=i+1;
end

%Estabilidades
Estabilidad_Amplitud_l1=max(tabla(:,3))-min(tabla(:,3))
Estabilidad_Amplitud_l2=max(tabla(:,5))-min(tabla(:,5))
Estabilidad_Amplitud_l3=max(tabla(:,7))-min(tabla(:,7))
Estabilidad_Amplitud_l4=max(tabla(:,9))-min(tabla(:,9))
Estabilidad_Longonda_l1=max(tabla(:,2))-min(tabla(:,2))
Estabilidad_Longonda_l2=max(tabla(:,4))-min(tabla(:,4))
Estabilidad_Longonda_l3=max(tabla(:,6))-min(tabla(:,6))
Estabilidad_Longonda_l4=max(tabla(:,8))-min(tabla(:,8))
%La tabla final con los datos
tabla;
```


A.2.2. Código del script de Matlab para los intervalos de confianza de las estabilidades

```

%Confianza a 99%
tabla1=tabla;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*99/100);
media=mean(tabla(:,3));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,3));
[c,d]=min(tabla(:,3));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,3)=media;
else
    tabla(d,3)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_11_intervalo99=max(tabla(:,3))-min(tabla(:,3))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*99/100);
media=mean(tabla(:,5));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,5));
[c,d]=min(tabla(:,5));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,5)=media;
else
    tabla(d,5)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_12_intervalo99=max(tabla(:,5))-min(tabla(:,5))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*99/100);
media=mean(tabla(:,7));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,7));
[c,d]=min(tabla(:,7));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,7)=media;
else
    tabla(d,7)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_13_intervalo99=max(tabla(:,7))-min(tabla(:,7))

```

```

tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*99/100);
media=mean(tabla(:,9));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,9));
[c,d]=min(tabla(:,9));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,9)=media;
else
    tabla(d,9)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l4_intervalo99=max(tabla(:,9))-min(tabla(:,9))

%confianza a 90%
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*90/100);
media=mean(tabla(:,3));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,3));
[c,d]=min(tabla(:,3));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,3)=media;
else
    tabla(d,3)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l1_intervalo90=max(tabla(:,3))-min(tabla(:,3))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*90/100);
media=mean(tabla(:,5));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,5));
[c,d]=min(tabla(:,5));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,5)=media;
else
    tabla(d,5)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l2_intervalo90=max(tabla(:,5))-min(tabla(:,5))
tabla=tabla1;

```

```

eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*90/100);
media=mean(tabla(:,7));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,7));
[c,d]=min(tabla(:,7));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,7)=media;
else
    tabla(d,7)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l3_intervalo90=max(tabla(:,7))-min(tabla(:,7))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*90/100);
media=mean(tabla(:,9));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,9));
[c,d]=min(tabla(:,9));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,9)=media;
else
    tabla(d,9)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l4_intervalo90=max(tabla(:,9))-min(tabla(:,9))

%confianza a 75%
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*75/100);
media=mean(tabla(:,3));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,3));
[c,d]=min(tabla(:,3));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,3)=media;
else
    tabla(d,3)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l1_intervalo75=max(tabla(:,3))-min(tabla(:,3))
tabla=tabla1;

```

```

eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*75/100);
media=mean(tabla(:,5));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,5));
[c,d]=min(tabla(:,5));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,5)=media;
else
    tabla(d,5)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l2_intervalo75=max(tabla(:,5))-min(tabla(:,5))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*75/100);
media=mean(tabla(:,7));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,7));
[c,d]=min(tabla(:,7));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,7)=media;
else
    tabla(d,7)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

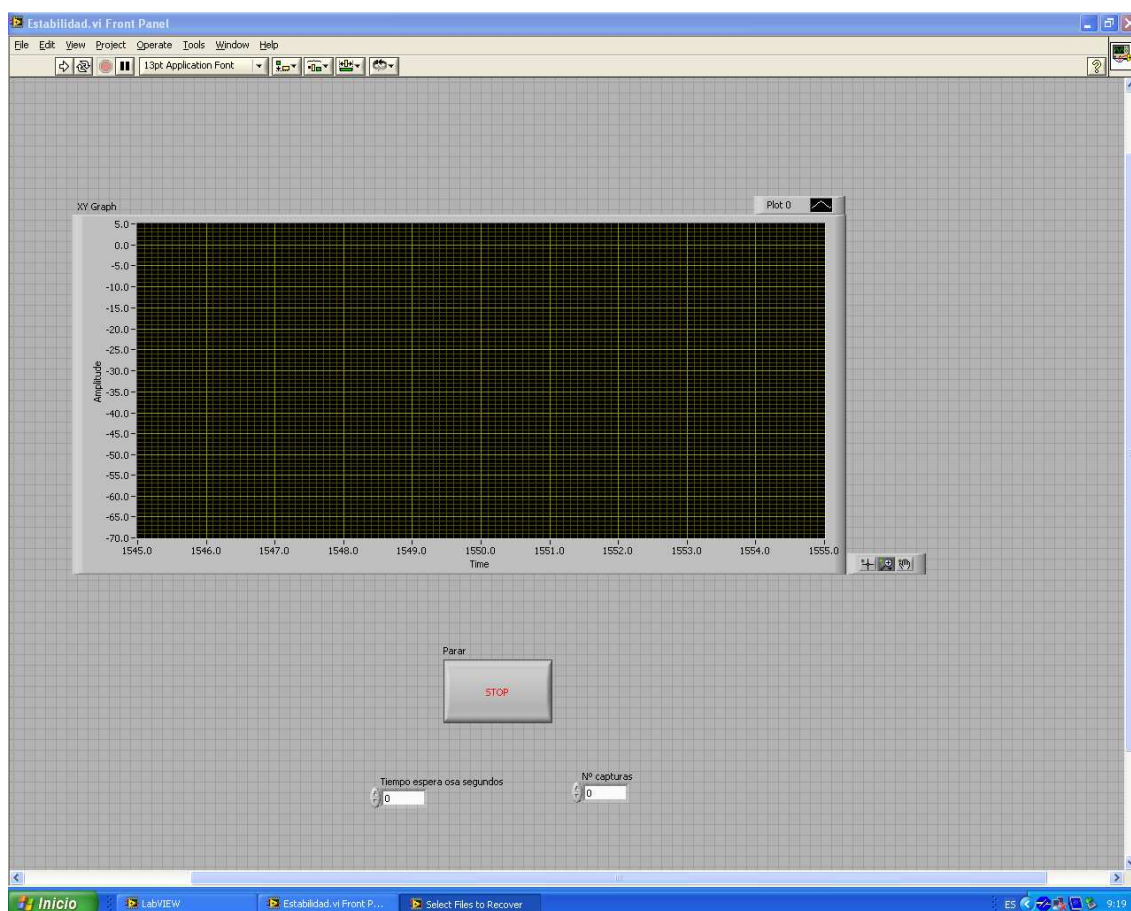
Estabilidad_Amplitud_l3_intervalo75=max(tabla(:,7))-min(tabla(:,7))
tabla=tabla1;
eliminar=length(tabla)-floor(length(tabla)*75/100);
media=mean(tabla(:,9));

while eliminar>0
[a,b]=max(tabla(:,9));
[c,d]=min(tabla(:,9));
maximo=abs(media-a);
minimo=abs(media-c);
if maximo>minimo
    tabla(b,9)=media;
else
    tabla(d,9)=media;
end
eliminar=eliminar-1;
end

Estabilidad_Amplitud_l4_intervalo75=max(tabla(:,9))-min(tabla(:,9))

```

A.3. OSA virtual – LabVIEW



Mediante el software de programación gráfica LabVIEW, diseñamos un analizador de espectros ópticos virtual. El cual nos sirve para realizar capturas periódicas de los valores de la señal óptica que esta siendo representada en el OSA del laboratorio.

En el panel frontal tenemos la representación gráfica de la señal y dos indicadores de control, uno de ellos para el número de capturas que se quieren realizar y el otro para el tiempo de espera entre ambas (en segundos).

Los datos obtenidos se manipulan mediante Matlab y Excel con el fin de obtener los valores de las estabildades de las estructuras analizadas, con diferentes intervalos de confianza para los mismos.

A.4. Publicaciones / Publicaciones en revisión

Multiwavelength Fiber Ring Laser based on Optical Add-Drop Multiplexers and a Photonic Crystal Fiber Sagnac Interferometer

Sergio Rota-Rodrigo, Rosa A. Perez-Herrera*, Isidoro Ibañez, Ana M. R. Pinto, Montserrat Fernandez-Vallejo and Manuel Lopez-Amo

*Department of Electric and Electronic Engineering, Universidad Pública de Navarra,
Campus Arrosadia S/N, E-31006, Pamplona, Spain*

**Corresponding author: rosa.perez@unavarra.es*

Abstract

In this paper, a configuration for a tunable multiwavelength erbium doped fiber ring laser based on optical add-drop multiplexers and a highly birefringent photonic crystal fiber Sagnac interferometer is proposed. Four different laser lines were obtained simultaneously all with an optical signal to noise ratio higher than 65 dB, the best to our knowledge when using photonic crystal fibers. This proposed configuration is based on commercial devices and is adapted to the ITU channel's normative.

Keywords: erbium doped fiber amplifier, optical add-drop multiplexer, Sagnac loop mirror, photonic crystal fiber

1 Introduction

The combination of dense wavelength-division multiplexing (DWDM) and erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) can take full advantage of the C-band fiber telecommunications bandwidth and increase the capacity and transmission distance of optical fiber links [1]-[2]. With the recent significant advances in wavelength routing devices and optical switches, optical add-drop multiplexers (OADMs) will play a critical role in enabling greater connectivity and flexibility in DWDM networks for multiwavelength signals locally transmitting/extracting, as well as signal routing and network (re)configuration at the hub and access nodes [3]-[4].

An OADM is a device that gives simultaneous access to all wavelength channels in WDM communication systems [5]. Their widespread use has increased their commercial applications, reducing significantly their cost in recent years. Moreover, multiwavelength erbium doped fiber lasers (MEDFL) have attracted much attention in recent years, mainly because of their advantages and applications. Their flexibility of design and compatibility with other fiber based systems lead to applications such as wavelength division multiplexed systems, spectroscopy, fiber sensor systems, optical device testing and microwave photonic

systems. Even more, applications like fiber optic communication or sensing systems need multi-channel signals with high optical signal-to-noise ratio (OSNR) and narrow bandwidth to reduce the transmission loss and signal distortion in the transmission line.

MEDFLs have been widely studied over the years and more recently, in combination with photonic crystal fibers (PCFs): through the use of a Sagnac reflector with 25 m of PCF in a ring cavity [6]; or by using 25 m PCF as a functional component in the ring cavity [7], or including 51 m of a nonlinear PCF and three fiber Bragg gratings (FBGs) [8]. Other erbium based structures are based on the combination of long lengths of PCF and other wavelength selective filters, such as a ring cavity based in 20 m of high nonlinear PCF and a thin-film Fabry-Perót etalon filter [9] or a ring cavity entailing 100 m high nonlinear PCF and a sample-chirped FBG [10]. Most of these configurations can reach a good OSNR of 50 dB but do not reach the 65 dB OSNR that were accomplished using FBGs [11], despite the use of long lengths of PCFs in their configurations.

In this work, we report a tunable and scalable MEDFL based on optical add-drop multiplexers and a Sagnac interferometer containing 3 m of highly birefringent PCF. Four lasing lines are obtained with an OSNR higher than 65 dB.

2 Experimental setup and results

Figure 1 illustrates the experimental setup of the proposed tunable multiwavelength fiber ring laser constructed with a commercial erbium doped fiber amplifier (EDFA) model EFA-P21 from MPB as the gain medium and a Sagnac loop mirror as the comb filter. The Sagnac interferometer is formed by a 3 dB optical coupler (OC), a polarization controller (PC) and one section of highly birefringent photonic crystal fiber (Hi-Bi PCF). This Hi-Bi PCF (PM-1550-01 of NKT Photonics) presents a beat length lower than 4mm and a temperature coefficient measured to be 30 times lower than that of a conventional polarization maintaining fiber. An optical spectrum analyzer (OSA) with 0.01 nm resolution was used to retrieve the output signal.

In this configuration, four OADMs were used to direct the signal inside the ring into four different branches, ensuring unidirectional operation and therefore avoiding the spatial hole-burning effect. Each branch is composed of an OADM and an optical variable attenuator (VA).

One of the major problems in these kinds of multiwavelength erbium-doped fiber lasers is correctly adjusting the cavity losses on each wavelength in order to achieve oscillation of the system in all the desired channels. As it is well known, the oscillation threshold power for each wavelength is different due to the non-flat shape of the erbium fiber gain profile. The use

of this topology enables the required individual loss control for each wavelength in order to ease the power equalization.

The Sagnac loop mirror output signal was filtered by the array of OADMs. The ITU channels selected by these OADMs were C37, C41, C43 and C47 corresponding with the wavelength values of 1547.72 nm, 1544.53 nm, 1542.94 nm and 1539.77 nm, respectively. After being equalized, these four signals were collected by means of: (a) a 4×2 optical coupler and (b) an optical multiplexer into their ITU channels. A comparison between these two different options for collecting the four arm signals was carried out. As expected, the output power levels obtained for the configuration with a 4×2 optical coupler was about 6 dB lower than the one using the multiplexer.

For the proposed configuration, the optimum coupling ratio for this structure was found to be 30%-70%. This coupling ratio enabled the extraction of 30% of the laser's output power into the OSA.

Experimental studies were carried out in order to find the proper length of Hi-Bi PCF in the Sagnac loop mirror and consequently optimize the tunable capacity of the proposed laser. It was observed that the proper length of the HI-BI PCF for this proper application was ~3 meters. Figure 2 shows the measured transmission spectra of the 3 m Hi-Bi PCF Sagnac loop mirror (solid line) and the OADM response (dotted line), taking individually while illuminating each of them with a broadband light source. As can be seen in this figure, by using this setting of the PC, a number of different wavelength laser emissions could be obtained for each one of the OADM's channels.

A tunable filter of 0.8 nm bandwidth was located at the output port of one of the OADMs (channel C41) in order to select a specific wavelength emission line. Figure 3 shows two possible outputs of the four-wavelength EDFRLs, generated by fine-tuning the filter placed at the output port of channel C41. These four laser lines could be easily tuned by inserting tunable filters at the output port of the others channels, in the same way as it was done for the channel C41.

The output power of each one of the four output channels is ~-7.5 dBm and, for every channel, the signal output power is more than 65 dB higher than the amplified spontaneous emission (ASE) noise floor, although low amplitude residual side-lobes corresponding to non-excited wavelengths inside the multiplexers bands can be observed. As it was previously mentioned, one of the advantages of this topology in comparison with the typical in-line filtering ones is to easy control the individual losses of each channel. Because of that, new channels could be incorporated in a very simple way, that is, only by adding new optical OADMs.

The output power of the lasing wavelengths can suffer some changes over time. For this reason, the time variations of the output power were measured for this MEDFRL. The instability was defined as the output power for a given interval of time and a specific confidence level (CL). This is the probability value associated with a confidence interval, given as a percentage. The confidence interval (CI) is the estimated range of values where the parameter of interest is included. We have tested the lasing output signals during a period of 10 minutes. The measured data was stored each 10 seconds and a CL of 90% was considered. It was observed, that at room temperature the peak powers averaged presented a variation between 1.8 dB and 2.3 dB for different lasing wavelengths. The output of the proposed multiwavelength fiber laser is not completely stable at room temperature because of the gain competition of the different wavelengths. This competition could be reduced by using different methods [12].

3 Conclusions

A multiwavelength erbium fiber ring laser was proposed and experimentally demonstrated based on optical add-drops multiplexers and a Hi-Bi PCF Sagnac loop mirror. Four emission laser lines were obtained simultaneously. Each of the lasing lines presented an OSNR higher than 65 dB, an OSNR as high as the highest obtained with the mature FBG technology, despite the use of a small length of Hi-Bi PCF (3 m). Experimental results confirmed that a specific wavelength laser emission can be selected for each channel only by using a tunable filter. In addition, independent control of optical losses for each channel can be easily achieved, improving the equalization process of the laser. One of the advantages of the proposed structure is the possibility of increasing the number of lasing channels by simply connecting more OADMs in a serial topology. Also, given that OADMs are optical communication devices the system is adapted to the ITU channels normative. Finally, the use of these devices in commercial applications had a widespread increase over the years, reducing significantly their cost.

Acknowledgement

The authors are grateful to the Spanish Government project TEC2010-20224-C02-01.

References

- [1] X. Zhou, G. Liang and T. Wang, An Optical Add-Drop Multiplexer Design Based on Fiber Bragg Gratings, in Proc. 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011), Dalian, Liaoning, (2011) V2-41 V2-43
- [2] L.D. Garrett, M.H. Eiselt, J.M. Wiesenfeld, M.R. Young and R.W. Tkach, Bidirectional ULH transmission of 160-gb/s full-duplex capacity over 5000 km in a fully bidirectional recirculating loop, IEEE Photon. Technol. Lett. 16 (2004) 1757-1759.
- [3] Z. X. Wang, C. L. Lin, C. K. Chan, Demonstration of a single-fiber self-healing CWDM metro access ring network with uni-directional OADM, IEEE Photon. Technol. Lett. 18 (2006) 163-165.
- [4] C. Marra, A. Nirmalathas, D. Novak, C Lim, L. Reekie, JA. Besley, C Weeks, N. Baker, Wavelength-interleaved OADMs incorporating optimized multiple phase-shifted FBGs for fiber-radio systems, IEEE J. Lightwave Technol. 21 (2003) 32-39.
- [5] K. Okamoto, K. Takiguchi and Y. Ohmori, 16-channel optical add/drop multiplexer using silica-based arrayed-waveguide gratings, Electron. Letter. 31 (1995) 723-724.
- [6] D. Chen, Stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a photonic crystal fiber Sagnac loop filter, Laser Phys. Letter. 4 (2007) 437-439.
- [7] D. Chen and L. Shen, Switchable and tunable Erbium-doped fiber ring laser incorporating a birefringent and highly nonlinear photonic crystal fiber, Laser Phys. Letter. 4 (2007) 368-370.
- [8] X. M. Liu , X. Zhou , X. Tang , J. Ng , J. Hao , T. Y. Chai, E. Leong and C. Lu, Switchable and tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser with fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber, IEEE Photon. Technol. Lett. 17 (2005) 1626-1628.
- [9] A. L. Zhang, H. Liu, M. S. Demokan, and H. Y. Tam, Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber, IEEE Photon. Technol. Lett. 17 (2005) 2535-2537.
- [10] X. M. Liu, Y. Chung, A. Lin, W. Zhao, K. Q. Lu, Y. S. Wang, and T. Y. Zhang, Tunable and switchable multi-wavelength erbium doped fiber laser with highly nonlinear photonic crystal fiber and polarization controllers, Laser Phys. Letter. 5 (2008) 904-907.
- [11] S. Rota-Rodrigo, R.A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo, and M. López-Amo, Low noise dual-wavelength erbium fiber laser in single-longitudinal-mode operation, Appl. Phys. B 106 (2012) 563-567.
- [12] A. Bellemare, Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers, Prog. in Quantum Electronics 27 (2003) 211-266.

Figures

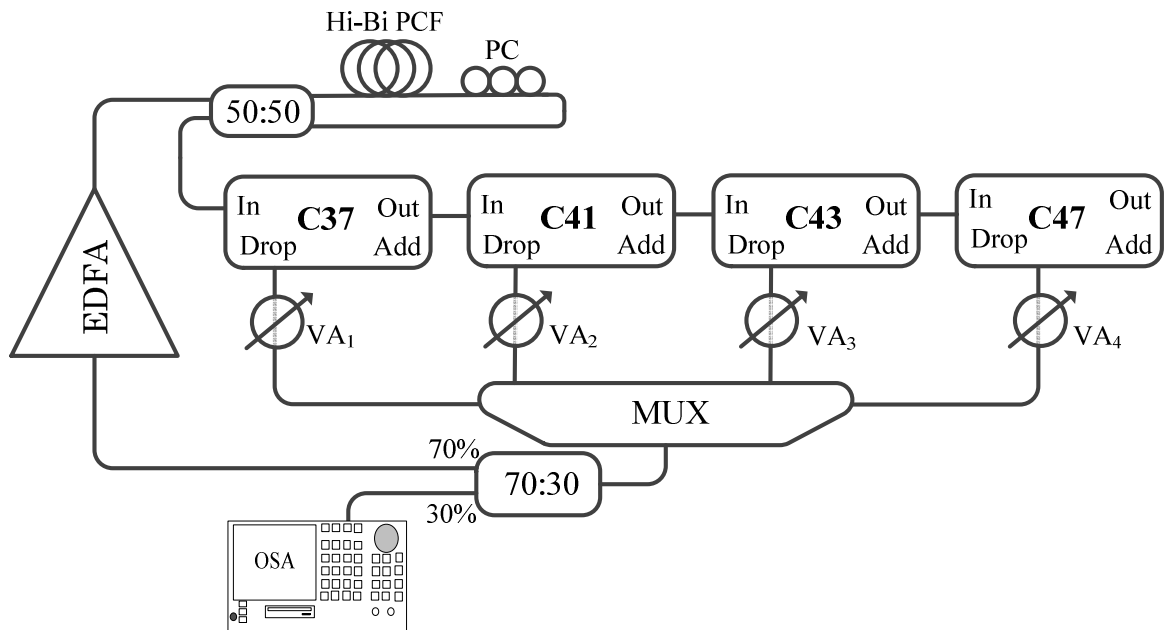


Figure 1. Experimental scheme for the proposed tuneable four-wavelength erbium doped fiber ring laser configuration based on optical add-dropp multiplexers and a Sagnac loop mirror.

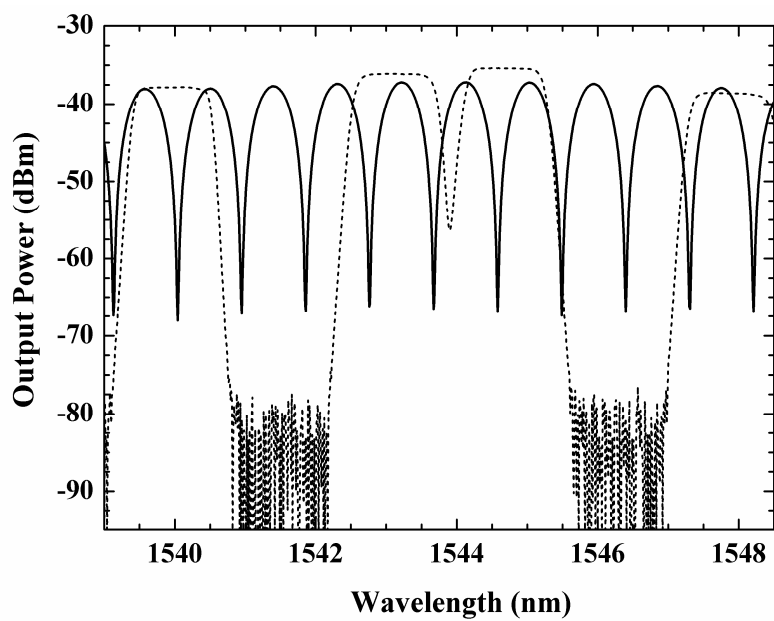


Figure 2. Measured transmission spectra of the Sagnac loop mirror (solid line) and the OADMs response (dotted line).

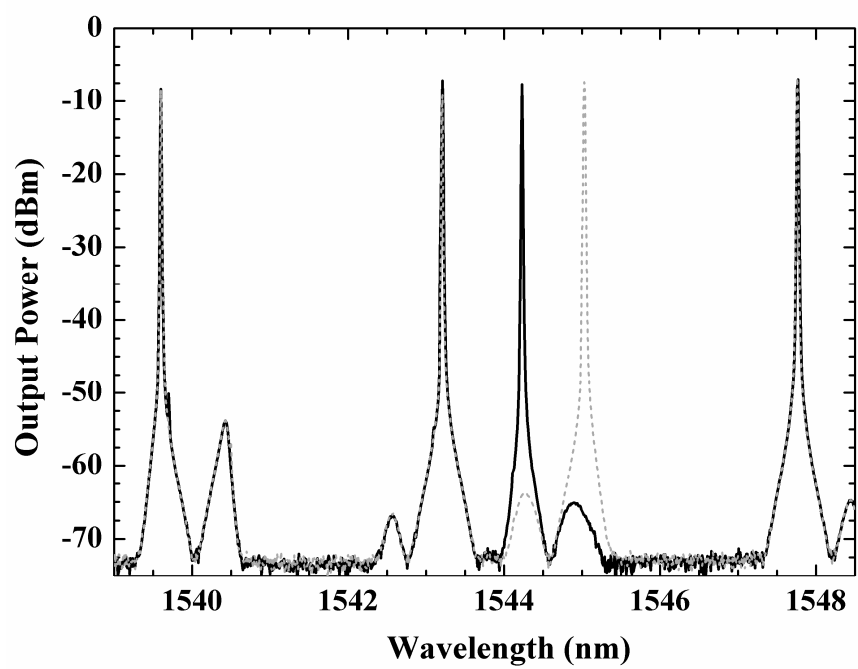


Figure 3. Shift of the output spectra of the four-wavelength EDFRL proposed by adjusting the tunable filter at channel 41.

Multi-Wavelength Fiber Laser in Single-Longitudinal-Mode Operation using a Photonic Crystal Fiber Sagnac Interferometer

S. Rota-Rodrigo^{*}, I. Ibañez and M. López-Amo

Department of Electric and Electronic Engineering, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía s/n E-31006 Pamplona, Spain

^{*}Corresponding author: sergio.rota@unavarra.es

Abstract

In this paper, we report a new configuration of a tunable multi-wavelength erbium doped fiber laser based on commercial optical multiplexers and a Sagnac interferometer which includes a section of a high-birefringent photonic crystal fiber. Four-wavelength laser emission lines were obtained simultaneously in single-longitudinal-mode operation showing a power instability lower than 1dB, and an OSNR higher than 65dB for all the emitted wavelengths. This proposed configuration allows the individual control of the loss of each channel of the laser and because of it is based on commercial ITU-grid multiplexers, the laser is adapted to the telecommunications channel's normative.

1. Introduction

Dense wavelength-division multiplexing (DWDM) and erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) have been widely studied for increasing the capacity of the bandwidth and the length of the networks in the telecommunications C-Band.[1,2]

An optical multiplexer is a device that combines different input-wavelengths signals into one output and vice versa. This kind of devices is used in DWDM networks to extract and recombine the signals [2]. Due to their extensive use, they have increased their commercial applicability reducing significantly their cost in the recent years.

Single-mode multiwavelength erbium-doped fiber-ring lasers (MEDFRLs) are very attractive sources due to their advantages: they are simple structures that have a narrow linewidth, showing a good compatibility with other optical fiber components [3,4]. These properties lead to these lasers to applications such as wavelength division multiplexed systems, spectroscopy, fiber sensor systems, optical devices testing and microwave photonic systems.

To achieve single longitudinal mode (SLM) operation, diverse setups have been proposed. In [5] a multi-ring cavity was used to ensure the SLM operation, beside this in [6] a saturable absorber was added to the topology, but the efficiency of the laser was reduced due to the absorbed power into the ring. A fiber Bragg grating (FBG) Fabry-Pérot etalon topology was proposed in [7]. In these filtering configurations, the spacing between the longitudinal modes must be as big as possible in order to achieve the SLM operation regime.

In the recent years MEDFLs have been researched used in combination with photonic crystal fibers (PCFs). For example, in [8] it was used a Sagnac reflector with 25 m PCF into a ring cavity. Another configuration used the PCF as a functional component inside the ring cavity [9]. In [10] the PCF was used to generate four wave mixing (FWM) by using its non-linear properties. An important factor of merit of MEDRFLs is the optical signal-to-noise ratio (OSNR). In [11] a MEDFL with an OSNR>65dB was achieved using FBGs; however for the previous mentioned topologies made with PCFs, this value was about 50 dB.

In this work, we report a MEDFRL that operates in SLM regime, based on optical multiplexers/demultiplexers and a Sagnac fiber interferometer containing one section of a High birefringent (Hi-Bi) polarization maintaining photonic crystal fiber (PCF), and a polarization controller (PC). Four lasing lines in single-mode-operation are obtained showing OSNRs higher than 65 dB.

2. Experimental setup and results

Figure 1 shows the experimental setup of the proposed multiwavelength laser structure. The gain medium is a commercial EDFA model EFA-P21a manufacturer MPB and the filtering section is formed by a PCF Sagnac interferometer and a couple of thin-film wavelength division multiplexer/demultiplexers (MUX/DMUX DWDM 200G 4Ch from AFOP).

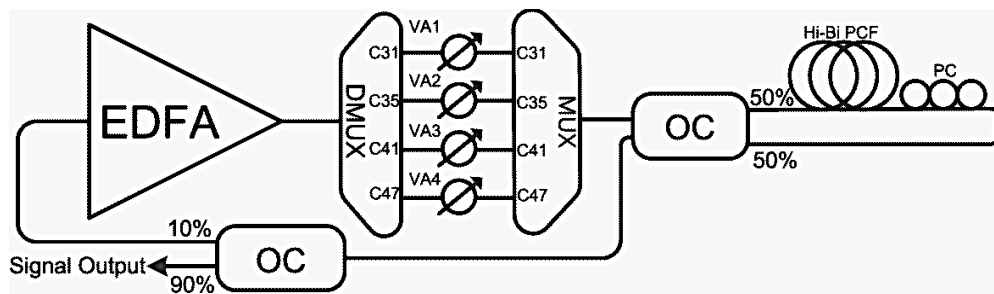


Figure 1. Schematic diagram of the proposed multi-wavelength erbium doped fiber ring laser configuration. OC: Optical coupler, MUX: Optical Multiplexer, DMUX: Optical demultiplexer, PC: Polarization controller, EDFA: Erbium-doped fiber amplifier, VA: Variable attenuator.

The Sagnac interferometer is made with a 3dB optical coupler, a PC and a section of a Hi-Bi PCF (PM-1550-01 of NKT Photonics). This fiber presents a beat length lower than 4mm and a temperature coefficient that it is 30 times lower than the obtained using a conventional Hi-Bi fiber.

The MUX/DMUX setup is used to select the interference signal from the Sagnac loop mirror in order to obtain laser emitted wavelengths only at the ITU wavelength channels. This structure also filters the out-of-band amplified spontaneous emission noise (ASE) generated by EDFA improving its amplification efficiency.

The ITU channels selected by these MUX were C31, C35, C41 and C47 corresponding to the wavelength values of 1552.52 nm, 1549.32 nm, 1544.53 nm and 1539.77 nm respectively. One of the advantages of this MUX/DMUX structure in comparison with typical in-line filtering is the ease of the individual control of the loss of each channel by including variable attenuators between the MUX and the DMUX. Because of that and due to the low loss of this kind of devices we could increase the number of wavelengths of the laser by replacing the MUX/DEMUX configuration to another with more channels.

We used a 90:10 coupler to enable the extraction of the 90% of the laser output power from the ring to the output, being the other 10% redirected to the erbium doped amplifier. The EDFA has an internal isolator ensuring the unidirectional operation of the multi-wavelength laser and therefore avoiding the spatial hole-burning.

As the transmission comb filter it was used a Sagnac loop mirror that consist of a polarization controller and a section of Hi-Bi fiber. In order to optimize the tunability of the system, several experimental studies were carried out and revealed that the proper length of the Hi-Bi PCF was about 3 meters. The temperature sensitivity for this fiber was measured to be 0.29 pm/°C [12], leading to no further power variations due to temperature variations.

The Sagnac was set at its maximum transfer function by adjusting the PC. Figure 2 shows the superposed measured spectra of the Sagnac loop mirror (solid line) and the MUX/DMUX response (dotted line) measured by using a broadband light source. This configuration allowed the selection between two wavelengths in each channel.

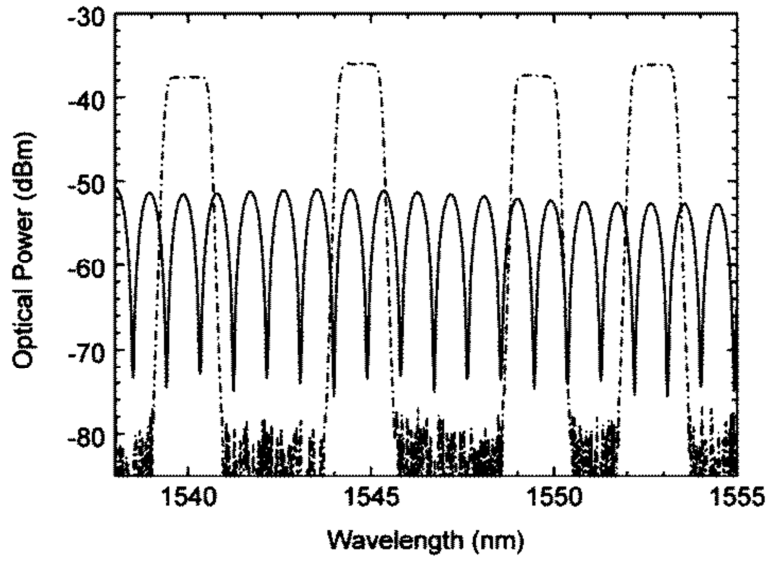


Figure 2. Measured transmission spectra of the Sagnac loop mirror (solid line) and the MUX-DMUX response without the Sagnac loop mirror (dotted line).

Figure 3(a) shows two possible four-wavelength EDFLs with the tunable filter of 0.8 nm bandwidth located at channel 35 and placed between the MUX and DMUX. The measurement was carried out using a high resolution Brillouin optical spectrum analyzer (BOSA OPT100 from Aragon Photonics) with a resolution of 0.08 pm. All these four laser emissions can be tuned by including other filters in each connection. The band-width at -3dB (BW_{-3dB}) measured at BOSA for all wavelengths was lower than 0.3 pm. In order to determine the OSNR an additional measurement was made using an optical spectrum analyzer (OSA Q8384 from Advantest), because this device has more sensitivity than the BOSA, and reveals an OSNR >65 dB for all channels. Figure 3(b) shows the measured spectrum at channel 31.

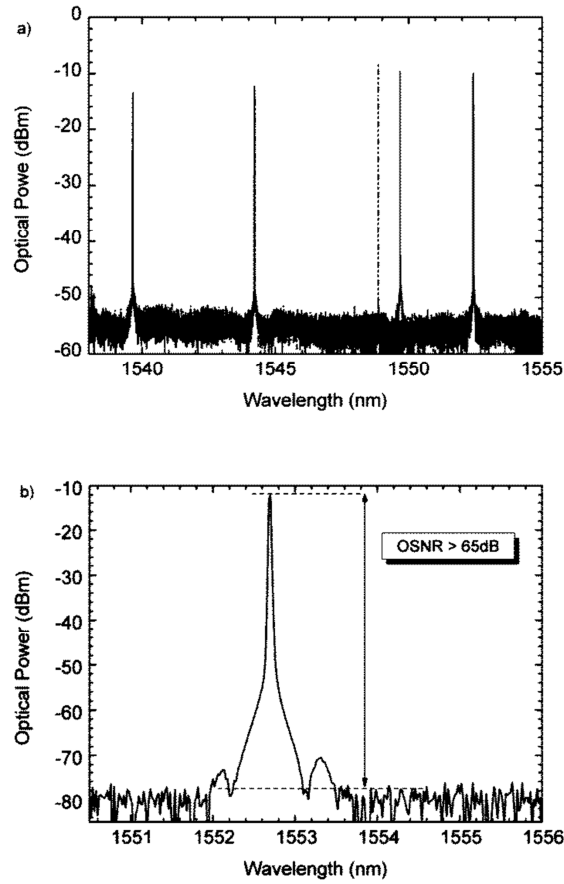


Figure 3. (a) Shift of the output spectra of the four-wavelength EDFRL proposed by adjusting the tunable filter at channel 35, measured by the BOSA. (b) Spectrum at channel 31 measured by the OSA.

A good stability and single-longitudinal-mode operation are required from MEDFRL in some specific applications.

Let us first consider the SLM operation.

The number of longitudinal modes and the space between them in a fiber laser ring are defined by:

$$\text{Number of modes} = \frac{FWHM_{Sagnac}}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

$$\text{and } \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{nL} \quad (2)$$

Where: $\Delta\lambda$ is the mode spacing between longitudinal modes of the ring

n is the refractive index

L is the ring length

λ is the central mode wavelength

$FWHM_{Sagnac}$ is the bandwidth of one the lobules of our Sagnac filter

Taking into account: $n=1.5$; $L=34$ m; $\text{FWHM}_{\text{Sagnac}}=0.46$ nm and the corresponding values of λ for each channel provided previously; 9897, 9838, 9779 and 9737 are the calculated number of modes inside the emission lines centered at 1539.6 nm, 1544.2 nm, 1548.8 nm and 1552.2 nm, respectively.

However, figure 3(a) shows the measurement of the four-laser emission in single-longitudinal-mode operation. In [13] an SLM fiber ring laser was achieved by annihilating the mode competition with an auxiliary lasing, also in [14] a self-elimination of longitudinal modes were observed in a multiwavelength configuration. In order to confirm this effect in this new structure we studied the measured modes from the channel 31, using the maximum resolution of the BOSA (0.08 pm), in two situations. At first, only this wavelength was emitted. This situation corresponds to a multi-longitudinal-mode behavior as it is shown in Fig. 4(a). However when other channel was introduced into the system, each emitted wavelength starts operating in a single-longitudinal mode regime, Fig. 4(b). From this, one can infer that because of the interaction of the seed light produced from one channel to the other and vice versa, the multiple-longitudinal-mode oscillation inside each channel is suppressed, and thus the mode competition and mode hopping is not produced. Previous works of the authors also corroborate this fact [11,14].

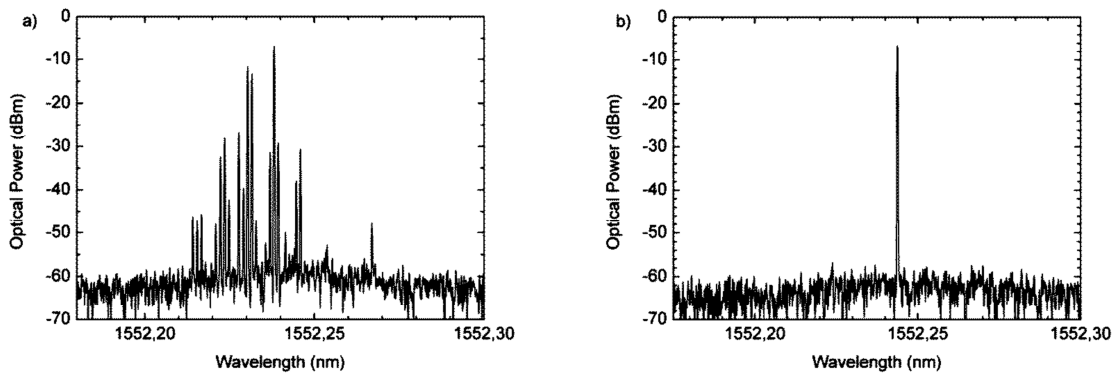


Figure 4. Output optical spectrum measured by the BOSA for the channel 31, at single-wavelength operation (a) and at dual-wavelength operation with channel 47 (b).

To determinate the instability of the system the output power of the EDFL was measured and analyzed. This parameter was defined as the output power for a given interval of time and a specific confidence level (CL). This is the probability value associated with a confidence interval, given as a percentage. The confidence interval (CI) is the estimated range of values where the parameter of interest is included [15].

The EDRFL has been tested with all the four channel laser outputs in operation for a period of 10 minutes with an acquisition time of 10 s and a CL of 90%, at room temperature. Figure 5 shows the fluctuation of the output power

for channel 47, that shows an instability of 0.82dB. The rest of the measured values were 0.93 dB, 0.95 dB and 0.97dB, corresponding with the channels 41, 35 and 31, respectively.

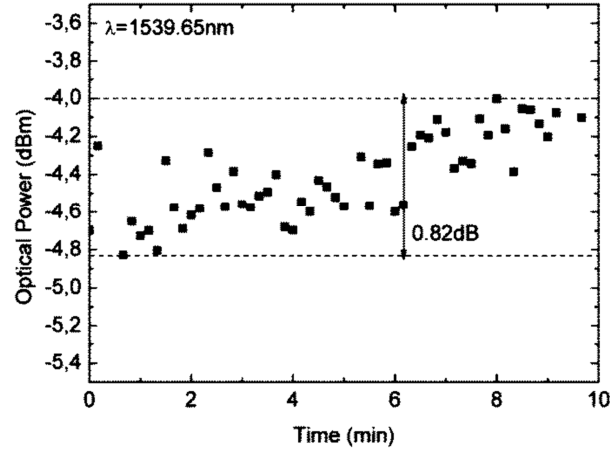


Figure 5. Output power fluctuation for the emission line centered at 1539.65 nm with all the four channel laser outputs in operation.

3. Conclusions

To summarize, we have proposed and demonstrated a novel configuration of an EDFRL based on optical MUX/DMUXs and a Hi-Bi-PCF Sagnac loop mirror. Four single-longitudinal-mode wavelength laser emissions have been obtained simultaneously showing a power instability lower than 1dB, a BW_{-3dB} lower than 0.3 pm, and an OSNR higher than 65 dB for all of them. We have also demonstrated the possibility to switch two different wavelengths for each channel only by using a tunable filter. Beside this, we achieve an independent control of the losses for each channel of the laser, improving the equalization process.

MUX/DMUXs are standard optical communication devices, thus the system is adapted to the ITU channels normative and, in addition, this device makes it possible to increment the number of lasers only by using MUX/DMUXs having more channels.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Spanish government project TEC2010-20224-C02-01

References

1. L.D. Garrett, M.H. Eiselt, J.M. Wiesenfeld, M.R. Young, R.W. Tkach: IEEE Photonics Technol.Lett. 16 (2004) 1757-1759.
2. V. Kaman, X. Zheng, S. Yuan, J. Klingshirn, C. Púsarla, R.J. Helkey, et al: IEEE Photonics Technol. Lett. 17 (2005) 1977-1979.
3. A. Bellemare: Progress in Quantum Electronics. 27 (2003) 211-266.
4. J.M. López-Higuera: *Handbook of Optical Fiber Sensing Technology*. (2002) 800.
5. S. Pan, Z. Xiaofan, L. Caiyun: Opt.Lett. 33 (2008) 764-766.
6. K. Zhang, J.U. Kang: Opt Exp. 16 (2008) 14173-14179.
7. J.L. Zhou, L. Xia, X.P. Cheng, X.P. Dong, P. Shum: Appl.Phy. B. 91 (2008) 99-103.
8. D. Chen: Laser Phy. Lett.. 4 (2007) 437-439.
9. D. Chen, L. She: Laser Phy. Lett. 4 (2007) 368-370.
10. X. Liu, X. Zhou, X. Tang, J. Ng, J. Hao, T.Y. Chai, et al: IEEE Photonics Technol. Lett. 17 (2005) 1626-1628.
11. S. Rota-Rodrigo, R.A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo, M. López-Amo: Appl.Phy. B. 106 (2012) 563-567.
12. C.- Zhao, X. Yang, C. Lu, W. Jin, M.S. Demokan: IEEE Photonics Technol. Lett. 16 (2004) 2535-2537.
13. J. Sun, L. Huang: Opt.Eng. 26 (2007) 074201.
14. M.A. Quintela, R.A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo, J.M. López-Higuera: IEEE Photonics Technol. Lett.. 22 (2010) 368-370.
15. R.A. Pérez-Herrera, M.A. Quintela, M. Fernández-Vallejo, A. Quintela, M. López-Amo, J.M. López-Higuera: J.Lightwave Technol. 27 (2009) 2563-2569.